

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mostafa Ben Boulaid – Batna-2
Institut d'Hygiène et Sécurité
Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI)



THESE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

EN HYGIÈNE ET SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

Option : Gestion des Risques

Par

TOUAHAR Hafed

Magister en Hygiène et Sécurité Industrielle

Thème :

Développement de Stratégies de Maintenance pour la Minimisation des Activations Intempestives des Systèmes Instrumentés de Sécurité.

Soutenu publiquement le 17 Mars 2022 devant le jury d'examen :

Dr. NAIT-SAID Rachid	Professeur	Univ. Batna 2	Président
Dr. KORICHI Mourad	Professeur	Univ. OUARGLA	Rapporteur
Dr. OUAZRAOUI Nouara	MCA	Univ. Batna 2	Co-rapporteur
Dr. SETTOU Noureddine	Professeur	Univ. OUARGLA	Examineur

Dédicaces

Merci à Dieu de m'avoir inculqué le savoir qui m'a permis
d'achever ce travail.

Je dédie de tout mon cœur ce modeste ouvrage :

À la mémoire de mon père (Puisse Allah avoir pitié de son âme).

À ma Mère,

À ma chère épouse,

À mon fils Siradj Eldine,

Mes chères sœurs,

Mes chers frères,

À l'ensemble de la famille Touahar,

À mes collègues.

Remerciements

Ce travail de recherche doctorale a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI) de l'institut d'Hygiène et Sécurité de l'université Mostafa Ben Boulaid - Batna 2.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et toute ma gratitude à Monsieur **KORICHI Mourad**, Professeur à l'Univ. D'Ouargla, d'avoir accepté de diriger ce travail, pour son soutien permanent, son aide constante et ses encouragements inconditionnés durant toute cette période consacrée au dit ouvrage.*

*Je tiens à remercier vivement Madame **OUAZRAOUI Nouara**, Maître de Conférences A de l'institut d'Hygiène et Sécurité de l'université Mostafa Ben Boulaid – Batna 2, d'avoir acceptée le Co-encadrement de ce travail et pour ses remarques pertinentes ainsi que son soutien continu qui sont concrétisés par l'achèvement de ce travail dans les meilleurs conditions.*

Je présente mes vifs remerciements aux membres du jury de soutenance de cette thèse de doctorat, à savoir :

*- Monsieur **NAIT-SAID Rachid**, Professeur à l'institut d'Hygiène et Sécurité de l'université Mostafa Ben Boulaid – Batna 2, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*- Monsieur **SETTOU Nouredine**, Professeur à l'Université d'Ouargla d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

J'exprime, également, ma profonde et immense gratitude aux Gérants de l'entreprise ACOSCO Messieurs ZERGAT Miloud et Mokhtar, pour leurs aides et supports logistiques.

J'exprime, également, ma profonde gratitude à tous les personnels de l'entreprise SONATRACH, division production, direction régionale d'In Amenas, en particulier Monsieur GUERGUEB Nabil pour leurs aides et fourniture des données sur l'unité RGTE (Récupération des Gaz Torchés du champ Edjeleh).

*Enfin, je présente mes vifs remerciements à tous mes collègues notamment : **KHANFRI Nour Elhouda**, **SIMOHAMED Antar** et **BACHI Bilal**.*

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Table des matières	III
Abréviations, acronymes	VI
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	X
ملخص	XI
Abstract	XII
Résumé	XIII
Introduction générale	
Problématique	1
Objectif de la recherche	2
Organisation de la thèse.....	2
Chapitre I : Stratégies de maintenance des Systèmes Instrumentés de Sécurité	
Introduction	4
I. 1. Systèmes instrumentés de sécurité (SIS).....	5
I.1.1. Définitions et concepts relatifs aux SIS	5
I.1.2. Intégrité de sécurité d'un SIS	7
I.1.3. Modes de fonctionnement des SIS et les paramètres cibles de défaillances.....	7
I.1.4. Notion de niveau d'intégrité de sécurité (SIL)	8
I. 2. Classification des défaillances des SIS	9
I.2.1. Classification des défaillances selon leurs causes.....	10
I.2.2. Classification des défaillances selon leurs effets sur la fonction de sécurité.....	11
I. 3. Maintenance des Systèmes Instrumentés de sécurité.....	13
I.3.1. Historique et l'évolution de la maintenance.....	13
I.3.2. Management de la maintenance des SIS dans la phase opérationnelle.....	15
I.3.2.1. Exploitation et la maintenance des SIS	15
I.3.2.2. Stratégies de maintenance des SIS en phase opérationnelle	16
I.3.2.2.1. Maintenance préventive.....	17
I.3.2.2.2. Tests des SIS.....	19

I.3.2.2.3. Inspection des SIS	22
I.3.2.2.4. Maintenance corrective.....	22
I.3.2.2.5. Maintenance centrée sur la fiabilité (MCR)	23
I.4. Contribution des facteurs humains et organisationnel dans la maintenance des SIS.....	23
I.4.1. Procédures et enregistrements de la maintenance des SIS	23
I.4.2. Staff de Management de la maintenance des SIS	24
I.5. Modélisation de coût de cycle de vie (LCC) de SIS	25
Conclusion	28

Chapitre II : *Modélisation et Evaluation quantitative des indicateurs de performances des SIS*

Introduction	29
II.1. Activations intempestives des SIS.....	30
II.1.1. Classification des activations intempestives	30
II.1.2. Causes des activations intempestives	32
II.2. Modélisation des performances des SIS	35
II.2.1. Redondance au sein d'un SIS et formules analytiques relatives aux indicateurs de performance.....	35
II.2.2. Formules analytiques de PFD et STR développées dans la littérature.....	38
II.3. Optimisation des performances des SIS	40
II.3.1. Optimisation Mono-objectif et Multi-objectifs	40
II.3.2. Etat de l' Art sur l'optimisation Multi-Objectif des performances des SIS	43
II.3.3. Optimisation Multi-objectifs des performances des SIS par les Algorithmes Génétiques (GA : Genitic Algorithm).....	46
Conclusion	49

Chapitre III : *Optimisation Multi-Objectifs des stratégies de maintenance des systèmes instrumentés de sécurité : Étude de Cas*

Introduction	50
III.1. Présentation générale de l'unité RGTE.....	51
III.1.1. Description du processus.....	53
III.1.1.1. Centres de séparation.....	53

III.1.1.2. Section Soufflante.....	54
III.1.1.3. Section Compression	55
III.1.1.4. Description d'un système d'arrêt d'urgence.....	55
III.2. Description du problème à optimiser	57
III.2.1. Système d'arrêt d'urgence ESD de la section soufflante	58
III.2.2. Modélisation du système ESD de la section soufflante.....	58
III.3. Implémentation des Algorithmes Génétiques et Résultats d'Optimisation	61
Conclusion	68

**Chapitre IV : Minimisation des effets environnementaux par l'optimisation Multi objectifs
des stratégies de maintenance des SIS : Etude de cas**

Introduction	69
IV.1.Cadre législatif et réglementaire Algérien relatif au torchage de gaz	71
IV.2.Revue de la littérature sur les effets des déclenchements intempestifs des SIS sur l'environnement.....	73
IV.3. Analyse des risques environnementaux causés par les activations des SIS	77
IV.3.1. Identification des scénarios conduisant au torchage de gaz	78
IV.3.2.Estimation de la fréquence de torchage causé par une activation réelle de l'ESD..	79
a. Premier scénario « Torchage causé par la défaillance de la boucle de régulation Température Pression.....	80
b. Deuxième scénario « Torchage causé par la défaillance de la boucle de régulation Niveau du liquide ».....	80
IV.3.3.Estimation de la fréquence de torchage causé par une activation intempestive de l'ESD.....	81
IV.4. Apport de l'optimisation multi-objectifs des stratégies de maintenance des SIS dans la réduction de torchage	85
Conclusion	91
Conclusion générale.....	92
Annexes	94
Références bibliographiques.....	97

Abréviations, Acronymes

- AG :** Algorithmes Génétiques
- CS :** Centre de séparation
- C_{STR}:** Coût de STR
- DC:** Diagnostic Coverage (Couverture du Diagnostic)
- DCC:** Défaillance de Cause Commune
- E/E/EP :** Electrique / Electronique / Electronique Programmable
- EN :** European Norm (Norme Européenne)
- ESD:** Emergency Shut Down (arrêt d'urgence)
- EUC:** Equipment Under Control (Equipement à protéger)
- FVF:** Futur value factor
- IEC:** International Electrotechnical Commission
- ISA:** Instrument Society of America
- ISA:** International Society of Automation
- ISO:** International Organisation for Standardization
- KooN:** K out of N (K parmi N)
- LCC:** LIFE CYCLE COST
- MATLAB:** MATrixLABoratory.
- MDT:** Mean Down Time
- MTBF:** Mean Time Between Failure
- MTBF:** Mean Time Between Failure
- MTTF:** Mean Time To (first) Failure
- MTTR :** Mean Time To Repair (durée moyenne de réparation)
- MTTRSD :** Durée moyenne de réparation d'une défaillance sûre (détectée).
- MUT :** Mean Up Time (durée moyenne de fonctionnement après réparation)
- NF :** Norme Française
- PFD :** Probability of Failure on Demand (probabilité de défaillance à la demande)
- PFH :** Probability of Failure per Hour (probabilité de défaillance par heure)
- PFS :** Probabilité de défaillance sûre (Intempestif)
- PVA:** Present value of an annuity factor
- PVF:** Present value factor

RFF : Risk Reduction Factor (facteur de réduction du risque)

RGTE : Récupération de gaz torchés Edjeleh

RT : Défaillance sûr (Réal)

RTR : Le taux de défaillance sûr (Réal)

SFF : Safe Failure Fraction (proportion des défaillances en sécurité)

SIF : Safety Instrumented Function (fonction instrumentée de sécurité)

SIL : Safety Integrity Level (niveau d'intégrité de sécurité)

SINTEF : (Norwegian: *Stiftelsen for industriell og teknisk forskning*), headquartered in Trondheim, Norway

SIS : Safety Instrumented System (Système Instrumenté de Sécurité).

SRS: Safety Requirements Specifications

STR : Le taux de défaillance sûr (Intempestif)

T1 : Durée entre deux tests périodiques

TEG: Triéthylène Glycol

TI : Intervalle de testes (an)

λ DU: Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel non détectée

λ S: Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel

λ SD: Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel détectée

λ SU: Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel non détectée

λ STD: Taux de défaillance intempestive du matériel détectée

λ STU: Taux de défaillance intempestive du matériel non détectée

λ NONC: Taux de défaillance non critique du matériel

λ SO: Taux de défaillance d'une opération intempestive

β D : Facteur correspondant aux défaillances de causes communes dangereuses

β SD : Facteur correspondant aux défaillances de causes communes intempestives détectées

β SU : Facteur correspondant aux défaillances de causes communes intempestives non détectées

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: L'architecture d'un SIS monocal (AI, CPU, DO)	06
Figure I.2 : La répartition des causes des défaillances systématiques selon UK	11
Figure I.3 : Classification des défaillances selon les normes et les standards des SIS	12
Figure I.4 : Évolution de la gestion de la maintenance depuis 1940	13
Figure I.5 : La phase opérationnelle et de maintenance du cycle de vie du SIS selon la norme IEC61511:2016	16
Figure I.6 : les activités de suivi des SIS dans la phase opérationnelle.....	17
Figure I.7 : L'effet de partial proof test sur la PFD avg et la planification de full test	21
Figure I.8 : Proof tests partiels de transmetteur de niveau	21

Chapitre II

Figure II.1 : Les différents types des activations intempestives	31
Figure II.2 : les décisions et les facteurs influençant les activations intempestives	33
Figure II.3 : Classification des problèmes d'optimisation selon SARKER et NEWTON en 2008	42
Figure II.4 : Organigramme d'un algorithme génétique	47

Chapitre III

Figure III.1 : Emplacement des installations du projet RGTE à EDJELEH	52
Figure III.2 : Organigramme générale du RGTE	53
Figure III.3 : Centre de séparation N° 8.....	54
Figure III.4 : Soufflante (11-K-001).....	55
Figure III.5 : Architecture du système ESD de RGTE	60
Figure III.6 : Codage de la première stratégie d'optimisation	61
Figure III.7 : Codage de la deuxième stratégie d'optimisation	61
Figure III.8 : Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la première stratégie Sans Contrainte	64
Figure III.9 : Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la première stratégie Sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$	64
Figure III.10: Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la deuxième stratégie Sans Contrainte.....	66

Figure III.11 : Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la deuxième stratégie Sous les contraintes : $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$ 66

Chapitre IV

Figure IV.1 : AdE relatif au premier scénario 80

Figure IV.2 : AdE relatif au deuxième scénario 81

Figure IV.3 : Modélisation des causes d'arrêt intempestif d'ESD/de Torchage par l'AdD 84

Figure IV.4 : Le Front de Pareto de la première stratégie sans contraintes 87

Figure IV.5 : Le Front de Pareto de la première stratégie sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$ 87

Figure IV.6 : Le Front de Pareto de la deuxième stratégie sans contraintes 89

Figure IV.7 : Le Front de Pareto de la deuxième stratégie sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$ 89

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Les différents niveaux de SIL définis par la norme CEI 61508..09

Chapitre II

Tableau II.1 : Bloc-diagramme de fiabilité relatif aux (a) comportement dangereux et (b) sûrs (à gauche) et le Schéma électrique de 1001/1003/2002/2003 (à droite)..... 37

Tableau II.2 : Formules analytiques relatives aux PFD_{moy} et STR des architectures KooN.39

Chapitre III

Tableau III.1 : Les éléments du système ESD 59

Tableau III.2 : les données relatives aux composants d'ESD de la section soufflante..... 62

Tableau III.3 : Les solutions de Pareto Optimal de la première stratégie 63

Tableau III.4 : Les solutions de Pareto Optimal de la deuxième stratégie..... 65

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Identification des scénarios conduisant au torchage de gaz par HAZOP.....78

Tableau IV.2 : PFD et fréquence des barrières de sécurité existantes 79

Tableau IV.3 : STR des différents sous systèmes d'ESD..... 82

Tableau IV.4 : L'optimisation multi-objectifs de STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et $LCC_{T\&CM}$ et la Quantité de Gaz Torchée (stratégie 01)..... 86

Tableau IV.5 : L'optimisation multi-objectifs de STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et $LCC_{T\&CM}$ et la Quantité de Gaz Torchée (Stratégie 02)..... 88

المخلص

تهدف أنظمة السلامة المجهزة (Système Instrumenté de Sécurité: SIS) إلى وضع المنشآت في حالة أمنية مستقرة، وذلك في حالة وجود أخطار حقيقية تهدد الموارد البشرية، المادية أو البيئية. غير أنه في بعض الحالات، تُفعل هذه الأنظمة بطريقة زائفة حتى في عدم وجود أدنى خطر حقيقي. ويتميز هذا التفعيل رياضياً بتواتر يعرف بمعدل التنشيط الزائف (Taux de déclenchement intempestif : STR).

إنّ عدم القدرة على التنبؤ بهذه التنشيطات يجعلها خطرة للغاية، حيث تُشير الخبرات السابقة إلى أن حدوثها يؤدي إلى خسائر تقنية، اقتصادية وبيئية كبيرة (خسائر في الإنتاج، التلوث البيئي و العقوبات المصاحبة له، تكاليف الصيانة، تكاليف إعادة تشغيل المنشآت، وكذا كثرة الشكاوي الصادرة من العملاء أو الزبائن... الخ)؛ وبالتالي، فإنه من الضروري جداً على المُصنّعين التقليل من مثل هاته التنشيطات إلى أقصى حد ممكن و هذا ما يُفسر أهمية البحث العلمي المقدم في هذه الأطروحة، و المتمثل في اقتراح مناهج تحسين متعددة الأهداف، باستعمال الخوارزميات الجينية .

النموذج الأول المقترح يهدف إلى تقليل كل من $PFD_{moy ESD}$ و $STR_{moy ESD}$ بالإضافة إلى $LCC_T \& CM$ ، كل ذلك من خلال العمل على سياسة الصيانة من جهة، واختيار تركيبية ال SIS المتصل بمركز الضخ التابع للمنشأة RGTE من جهة أخرى حيث يتم تقييم استراتيجيتين : في الأولى يتم تطبيق سياسة اختبار (T) دون تغيير التركيبية في الجزء "K"، بينما في الثانية ، يتم تطبيق سياسة اختبار (T) مع التغيير في كل من فترة الاختبار (T) و التركيبية في الجزء "K" .

نظراً للتأثير الكبير لتعطيلات أنظمة ال SIS وحتى الزائفة منها على البيئة ، فإن النموذج الثاني المقترح له هدف مزدوج:

- التحليل والتقييم الكمي لترددات حرق الغاز الناتجة عن التنشيط الزائف لأنظمة التوقف في حالة وجود مخاطر ESD المتصلة بوحدة الضخ و ذلك باستعمال طرق تحليل المخاطر (HAZOP, AdE, AdD) ،

- الاختيار الأمثل لاستراتيجيات الصيانة من أجل التقليل من تواتر حرق الغاز بالإضافة إلى تحسين مؤشرات ال ESD المدروسة (PFD_{avg} و STR و LCC) مع مراعاة قيود تكلفة الصيانة الوقائية (تكلفة الاختبارات الدورية) وتكلفة الصيانة التصحيحية .

يشكّل النموذجان المطوّران أداة دعم لاتخاذ القرارات من طرف إدارة شركة SONATRACH ويساهمان في التحسين المستمر لأداء المنشآت النفطية المجهزة بأنظمة ال ESD.

المصطلحات الأساسية: استراتيجيات الصيانة المتعلقة بأنظمة السلامة المجهزة، التنشيطات الزائفة، التأثيرات البيئية، مناهج تحسين متعددة الأهداف، الخوارزميات الجينية .

Abstract

Safety Instrumented Systems (SIS) are designed to maintain a safe state of the process, while the processes engage in a ways that pose real risks to human beings, facilities, and to the environment. Otherwise, in some cases, and even in the absence of dangerous events, SISs can be activated spuriously. These activations are characterized in terms of frequency by spurious Trip Rate (STR).

The unpredictable nature of these activations makes them critical. A Feedback of similar system has shown that their occurrence leads to significant technical-economic and environmental losses (loss of production, pollution, pollution penalties, maintenance costs, process restarts costs, customer complaints, etc.). Therefore, it is incontestable for industrialists to reduce these spurious activations as much as possible. Hence, this work consists in proposing multi-objective optimization approaches, using genetic algorithms.

The first proposed model aims at minimizing the $PFD_{avg ESD}$, $STR_{avg ESD}$ as well as the $LCC_{T\&CM}$ based on the maintenance policy and the architecture vote of the implemented SIS of RGTE blower. Two strategies are assessed, in a first strategy a test policy (T) is implemented without changing the architecture vote 'K'. However, in a second strategy, a test policy (T) is implemented with the change of two parameters: the period test (T) and the architecture vote 'K'.

Despite the significant impact of SIS failures and their untimely tripping on the environment, the second model has a dual objective:

- Quantitative assessment of the flaring frequencies caused by untimely shutdowns of the ESD blower section using risk analysis methods (HAZOP, ET and FT)
- Optimize maintenance strategies in order to minimize the gas flaring frequency as well as the ESD performance indicators (PFD_{avg} , STR and LCC) taking into account the preventive maintenance costs constraints (cost of periodic tests) and corrective maintenance.

The developed models comprise a decision-making support tool for the SONATRACH management team and contribute to the continuous improvement of the oil installations equipped with ESD.

Key words: *SIS maintenance strategies, spurious activations, environmental effects, multi-objectives optimization of SIS, Genetic algorithms.*

Résumé

Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) sont des systèmes visant à mettre les procédés en position de replis, lorsque les procédés s'engagent dans des voies comportant des risques réels pour l'homme, les biens et l'environnement. Cependant, dans certains cas, et même en absence des événements dangereux, les SIS peuvent être activés d'une manière intempestive. Ces activations sont caractérisées en terme de fréquence par un taux de déclenchement intempestif (STR : *Spurious Trip Rate*). Le caractère imprévisible de ces activations les rend critiques. Le retour des expériences sur ces derniers a montré que leur occurrence conduit à des pertes technoéconomiques et environnementales importantes (perte de production, pollution, pénalité de pollution, coût de maintenance, coût de redémarrage du procédé, réclamations clients, etc.). Par conséquent, il est donc incontestable pour les industriels de réduire au maximum possible ces déclenchements. D'où l'intérêt des travaux de recherche, menés dans le cadre de cette thèse, qui consiste à proposer des approches d'optimisation multi-objectifs des performances des SIS, moyennant les Algorithmes génétiques.

Le premier modèle proposé a pour objectif la minimisation de la $PFD_{moy\ ESD}$, $STR_{moy\ ESD}$ ainsi que le $LCC_{T\&CM}$, tout ça en agissant sur la politique de maintenance d'une part, et sur le vote de l'architecture d'un SIS implémenté dans une section soufflante de l'RGTE d'une autre part. Deux stratégies sont évaluées, dans une première stratégie une politique de test (T) est implémentée sans changement de vote d'architecture 'K'. Par contre, dans une deuxième stratégie, une politique de test (T) est implémentée avec changement de deux paramètres: la période de test (T) et le vote d'architecture 'K'.

Vu l'impact important des défaillances des SIS et de leurs déclenchements intempestifs sur l'environnement, le deuxième modèle a un double objectif :

- Analyser et évaluer quantitativement les fréquences de torchage causées par des arrêts intempestifs de l'ESD de la section soufflante en utilisant des méthodes d'analyse de risques (HAZOP, AdE et AdD),
- Optimisation des stratégies de maintenance afin de minimiser la fréquence de torchage de gaz ainsi que les indicateurs des performances de l'ESD étudié (PFD_{avg} , STR et LCC) en prenant en considération les contraintes de coût de maintenance préventive (coût des tests périodiques) et coût de maintenance corrective.

Les deux modèles développés constituent un outil d'aide à la prise de décision pour l'équipe de management de l'entreprise SONATRACH et contribuent dans le management de l'amélioration continue des performances des installations pétrolières dotées d'ESD.

Mots clés : *Stratégies de Maintenance des SIS, Activations intempestives, effets environnementaux, optimisation Multi-objectifs des SIS, Algorithmes génétiques.*

Introduction Générale

Introduction générale

1. Problématique

Les installations industrielles dans le secteur énergétique à travers le monde, notamment en Algérie, deviennent techniquement de plus en plus complexes et le potentiel de danger s'accroît en conséquence si les risques inhérents à ces installations ne sont pas convenablement contrôlés. L'occurrence de ces risques peut mettre en danger la sécurité des installations, l'intégrité physique des travailleurs et celle du public et la qualité de l'environnement. La gestion de ces risques nécessite de mettre en place des mesures de maîtrise aussi communément appelées barrières de sécurité. Parmi ces barrières, les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) sont utilisés pour assurer la sécurité fonctionnelle des installations, c'est à dire la réduction des risques à un niveau inférieur ou égal au risque tolérable.

L'activation des SIS dans les processus industriels est effectuée après l'occurrence des déviations spécifiques ou situations dangereuses par rapport au fonctionnement normal. Mais dans certains cas les SIS sont activés en absence de toute déviation ou de demande : il s'agit des activations intempestives.

Le caractère imprévisible de ces activations les rend critiques. Le retour d'expériences sur les déclenchements intempestifs (ST) a montré que leur occurrence conduit à des pertes technico-économiques et environnementales importantes (perte de production, pollution environnementale, taxes de pollution, coûts de maintenance, coût de redémarrage du procédé, diminution du niveau de confiance du SIS, réclamations clients, ...etc.). Pour les industriels, il est donc incontestable de réduire au maximum possible ce type de déclenchements. En effet, l'optimisation des performances des SIS constitue un outil d'aide à la décision, que ce soit en ingénierie ou en économie et permet d'obtenir un compromis entre la sécurité, la disponibilité et la protection de l'environnement.

Afin d'optimiser les performances du SIS, à savoir la probabilité de défaillance à la demande (PFD), le taux de déclenchement intempestif (STR) et le coût du cycle de vie (LCC), plusieurs travaux ont été développés dans la littérature (Salazar et al, 2006 ; Torres, 2008, 2009, 2012 ;

Innal, 2015 ; Yury, 2017) en utilisant plusieurs techniques d'optimisation des SIS. Cependant, la plupart de ces études sont dédiées à la phase de conception (design) où le SIS n'est pas encore implémenté ce qui limite la prise de décision sur l'amélioration de ses performances ou la rendre difficile. En effet, certains problèmes surgissent durant la phase opérationnelle et qui ne sont pas pris en considération dans la phase de conception, tels que les conditions opérationnelles et environnementales, les facteurs de décision pris en considération pour le choix de la stratégie de maintenance tels que les facteurs de sécurité, de fiabilité, économiques et de maintenabilité (Dong, 2008).

Par ailleurs, certaines installations ont été implémentées avant l'apparition des premiers travaux sur les activations intempestives des SIS en 2008 (Rausand, 2008 ; Torres, 2008 ; Riauke 2008) où les déclenchements intempestifs n'étaient pas connus ni pris en considération par les industriels en particulier dans l'industrie pétrolière. C'est dans cette optique que s'intègre les travaux de recherche de cette thèse.

2. Objectifs de la recherche

Les objectifs principaux de cette thèse de doctorat est de proposer des approches d'optimisation multi-objectives des performances d'un SIS implémenté dans une installation industrielle opérationnelle mise en service en 2004 du projet RGTE :

La première approche proposée a pour objectif la minimisation de la $PFD_{moy\ ESD}$, $STR_{moy\ ESD}$ ainsi que le $LCC_{T\&CM}$, tout ça en agissant sur la politique de maintenance d'une part, et sur le vote de l'architecture du SIS d'une autre part. Deux stratégies sont évaluées, dans une première stratégie une politique de test (T) est implémentée sans changement de vote d'architecture 'K'. Par contre, dans une deuxième stratégie, une politique de test (T) est implémentée avec changement de deux paramètres: la période de test (T) et le vote d'architecture 'K'.

Vu l'impact important des défaillances des SIS et de leurs déclenchements intempestifs sur l'environnement, la deuxième approche a pour objectif d'analyser et d'évaluer quantitativement les fréquences de torchage causées par des arrêts intempestifs de l'ESD de la section soufflante en utilisant des méthodes d'analyse de risques (HAZOP, AdE et AdD) et l'optimisation des stratégies de maintenance afin de minimiser la fréquence de torchage de gaz ainsi que les indicateurs des performances de l'ESD étudié (PFD_{avg} , STR et LCC) en prenant en considération les contraintes de coût de maintenance préventive (coût des tests périodiques) et coût de maintenance corrective.

3. Organisation de la thèse

Le présent manuscrit en plus d'une introduction générale, est scindé en quatre chapitres :

- Au début de ce premier chapitre, nous allons présenter les notions de base et des concepts relatifs aux SIS, et leurs cadres normatifs, précisément la norme CEI 61508 et ses normes filles (IEC 61508, 2010 ; IEC 61511, 2016). Ensuite, les concepts relatifs à la maintenance des SIS, les stratégies de maintenance de ces derniers sont présentés, en mettant l'accent sur l'apport de l'optimisation des stratégies de maintenance des SIS sur leurs performances et leurs coût de cycle de vie.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des définitions, les classifications des causes, les types et les effets des activations intempestives. Par la suite un rappel des différentes formules analytiques développées dans la littérature, utilisées dans l'estimation des indicateurs de performance des SIS tels que PFD et STR. La classification et le processus

d'optimisation sont présentés en mettant l'accent sur l'optimisation Multi-objectif par les Algorithmes génétiques, après avoir présenté un état de l'art sur l'optimisation Multi-objectif des performances des SIS pour le choix des stratégies les plus optimales.

➤ Le troisième chapitre consiste à proposer une approche d'optimisation multi-objectifs des performances d'un SIS par la minimisation de la PFD_{avg} , le STR ainsi que le $LCC_{T\&M}$. Afin de valider l'approche proposée, elle a été appliquée à un système d'arrêt d'urgence (ESD) d'une section soufflante dans une installation industrielle de récupération et réinjection de gaz torchés (Gas lift) dans la région de EDJELEH - IN AMENAS dans le cadre du projet de RGTE (Rudall, 2005).

➤ Dans le quatrième chapitre, nous proposons une approche qui consiste dans un premier temps, à réaliser une analyse de risques afin d'estimer la fréquence de torchage dans le cas des activations de l'ESD réelle et intempestive de la section soufflante, en utilisant des outils d'analyse de risques. Ensuite, une optimisation des stratégies de maintenance par les algorithmes génétiques afin de minimiser les effets environnementaux liés au torchage de gaz causés par les arrêts intempestifs, en prenant en considération en plus des contraintes prises dans le modèle précédent (Chapitre III), les taxes de torchage et la quantité de gaz torchée.

Enfin, ce travail de recherche doctorale sera clos par une conclusion générale résumant le travail réalisé et donnant les perspectives de recherche envisageables.

Chapitre I

Stratégies de maintenance des Systèmes

Instrumentés de Sécurité

Introduction

Les établissements industriels deviennent techniquement de plus en plus complexes et le potentiel de danger s'accroît en conséquence si les flux de danger ne sont pas convenablement contrôlés. Lorsque les systèmes industriels présentent des risques potentiels sur les personnes, les biens et l'environnement, la gestion de ces risques nécessite la mise en place de mesures de maîtrise des risques aussi communément appelées barrières de sécurité. Ces dernières se différencient et se catégorisent par leur fonction (préventive/proactive), par leur nature (physique/non physique), par le mode de réalisation de la fonction de sécurité (active/passive) et enfin par technologie qui incorpore les systèmes instrumentés de sécurité (SIS).

Avec ce développement industriel dans le monde et la forte concurrence entre les industriels pour atteindre les exigences relatives à la qualité, la sécurité et la diminution des coûts des services fournis, le maintien des stratégies de maintenance adéquates est imposé comme un véritable enjeu concurrentiel, tant en terme de disponibilité et de performance des équipements existants qu'en terme de sécurité, qualité et coûts y inclus aussi les nouvelles préoccupations telles que les aspects environnementaux (les émissions de polluants).

L'instauration ou le choix de stratégies de maintenance a des impacts essentiels sur la performance et l'efficacité du système de management globale et donc sur l'avenir d'une entreprise (PEHRSSON, 2005).

Au début de ce premier chapitre, nous allons présenter les notions de base et des concepts relatifs aux SIS, leur fonctionnement, leurs typologies de défaillance et leurs cadres normatifs (précisément la norme CEI 61508 et ses normes filles).

Ensuite, les concepts relatifs à la maintenance des SIS, les stratégies de maintenance de ces dernières sont présentés, en mettant l'accent sur l'apport de l'optimisation des stratégies de maintenance des SIS sur leurs performances et leurs cout de cycle de vie.

I.1. Systèmes instrumentés de sécurité (SIS)

I.1.1. Définitions et concepts relatifs aux SIS

La norme CEI 61508 (IEC 61508, 2010) définit les systèmes relatifs aux applications de sécurité par: "*un système E/E/EP (Electrique/Electronique/Électronique Programmable) relatif aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité.*"

La norme CEI 61511(IEC61511, 2016) définit les systèmes instrumentés de sécurité de la façon suivante: "*système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité (SIF). Un SIS se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unités logique(s) et d'élément(s) terminal (aux).*"

Les systèmes suivants sont des exemples des systèmes instrumentés de sécurité :

- Système d'arrêt d'urgence (*ESD : Emergency Shutdown Systems*), utilisé par exemple dans les industries chimique et pétrochimique.
- Système d'arrêt automatique de train (*ATS : Automatic Train Stop*), utilisé dans le domaine ferroviaire.
- Système de freinage de l'automobile.
- Airbag.
- Système de détection de surface d'un avion.
- Équipements médicaux critiques de traitement et de surveillance.

Un SIS se compose de n'importe quelle combinaison de :

- ❖ **Sous-système S (Sensor)** : il est constitué d'un ensemble d'éléments d'entrée (capteurs, détecteurs) qui surveillent l'évolution des paramètres physico-chimiques représentatifs du comportement du procédé (température, pression, débit, niveau...). Si au moins un de ces paramètres dévie au-delà d'une valeur de consigne et s'y maintient, cette déviation constitue ce qui a été appelé demande ou sollicitation émanant du procédé, de l'EUC. Elle est détectée par les capteurs concernés qui envoient un signal au sous-système LS.
- ❖ **Sous-système LS (Logic Solver)** : ce sous-ensemble d'éléments logiques réalise le processus de prise de décision qui s'achève par l'activation du troisième sous-système FE. Le sous-système LS peut être un automate programmable ou un micro-ordinateur doté de logiciels spécifiques.

❖ **Sous-système FE (Final Element)** : ces éléments agissent directement (vannes d'arrêt d'urgence) ou indirectement (vannes solénoïdes) sur le procédé pour neutraliser sa dérive en mettant, en général, le système à l'arrêt (état sûr) au terme d'un délai qui doit être spécifié pour chaque fonction de sécurité (IEC 61508, 2010).

Un SIS, aussi appelé boucle de sécurité, est un ensemble d'éléments (matériel et logiciel) assurant la mise en état de sécurité des procédés lorsque des conditions prédéterminées sont atteintes, la figure (I.1) représente un exemple d'un SIS:

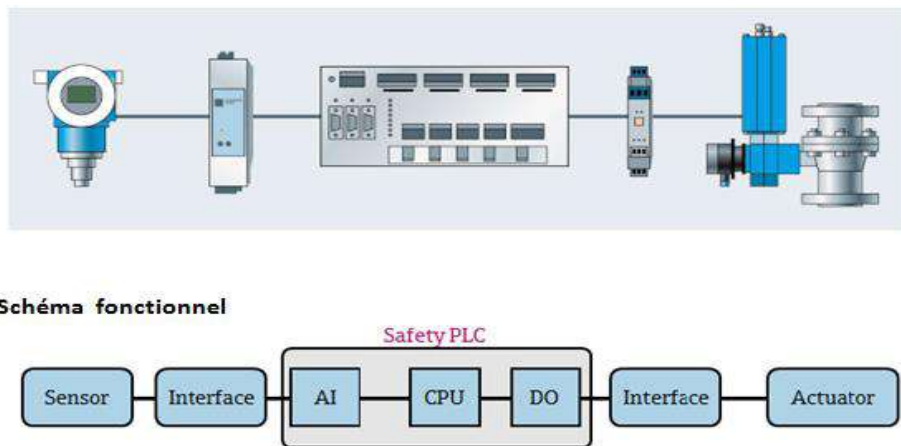


Figure I.1: L'architecture d'un SIS monocanal (AI: analog input, CPU: central processing unit, DO: digital output) (EMERSON DELTA V SIS, 2018).

Une **fonction instrumentée de sécurité (SIF : Safety Instrumented Function)** est une fonction à réaliser par un SIS prévu pour assurer ou maintenir un état de sécurité de l'équipement à protéger (EUC) par rapport à un événement dangereux spécifique.

Une fonction instrumentée de sécurité (SIF) est utilisée pour décrire les fonctions de sécurité implémentées par un système instrumenté de sécurité. Une SIF peut être considérée comme une barrière de protection fonctionnelle lorsque le système instrumenté de sécurité est considéré comme un système réalisant cette barrière de sécurité (SKLET, 2005).

Un SIS peut implémenter une ou plusieurs SIF. Pour une situation donnée, plusieurs fonctions de sécurité peuvent conduire à la réduction de la fréquence d'occurrence du danger.

L'architecture fonctionnelle d'un SIS est un ensemble de SIF qui comprend trois fonctionnalités de base, la détection (ou la mesure), le traitement (ou la décision) et l'actionnement.

I.1.2. Intégrité de sécurité d'un SIS

La référence (IEC 61508, 2010) l'a défini comme suit : "*Probabilité pour qu'un système relatif à la sécurité (SRS) exécute de manière satisfaisante les fonctions de sécurité requises dans toutes les conditions spécifiées et pour une période de temps spécifiée*". Elle indique également que cette définition est centrée sur la fiabilité des SRS dans l'exécution de leurs fonctions de sécurité.

Cette même référence, précise que l'intégrité de sécurité comprend l'intégrité de sécurité du matériel ainsi que l'intégrité de sécurité systématique. Elles sont définies ci-après :

- *Intégrité de sécurité du matériel* : Partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité liée aux défaillances aléatoires du matériel en mode de défaillance dangereux.
- *Intégrité de sécurité systématique* : partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité qui se rapporte aux défaillances systématiques dans un mode de défaillance dangereux, en précisant que l'intégrité systématique ne peut normalement, ou précisément, être quantifiée, mais simplement considérée d'un point de vue qualitatif.

Les prescriptions concernant l'intégrité de sécurité des fonctions de sécurité à allouer aux SIS sont spécifiées en termes de niveau d'intégrité de sécurité (*SIL*) : niveau discret parmi quatre possibles, le *SIL* 4 possède le plus haut degré d'intégrité de sécurité. Sa détermination dépend du mode de fonctionnement du SIS. Ce point est évoqué dans ce qui suit.

I.1.3. Modes de fonctionnement des SIS et les paramètres cibles de défaillances (IEC 61508, 2010) :

Les SIS sont caractérisés par deux mode de fonctionnement selon leurs sollicitations :

- **Fonctionnement en faible demande** : un SIS est en mode de fonctionnement à faible demande lorsque la fréquence de sollicitation est inférieure à une fois par an ($1/an$) ou inférieure au double de la fréquence des tests périodiques auxquels il est soumis

- **Probabilité moyenne de défaillance à la demande**, notée *PFD avg* (*Average Probability of Failure on Demand*). Elle n'est pas définie dans le volume 4 de la norme CEI 61508, malgré son utilisation dans plusieurs définitions et abréviations. Cette probabilité représente tout simplement l'indisponibilité moyenne d'un système E/E/EP relatif à la sécurité, qui rend ce dernier incapable d'effectuer correctement sa fonction de sécurité, lorsqu'il est faiblement sollicité.
- **Fonctionnement en forte demande ou demande continue**, Un SIS en mode de fonctionnement continu ou à forte demande implique une forte sollicitation du SIS. Il est considéré lorsque la fréquence de sollicitation est élevée ou continue, c'est-à-dire qu'elle est supérieure à une fois par an ($1/an$) ou supérieure à deux fois la fréquence des tests périodiques.
- **Probabilité de défaillance dangereuse par heure**, notée *PFH* (*Probability of a dangerous Failure per Hour*), est parfois appelée " fréquence des défaillances dangereuses ", ou " taux de défaillances dangereuses ", ou " nombre de défaillances dangereuses par heure ". La probabilité de défaillance par heure n'est pas aussi citée dans la partie 4 de la norme CEI 61508-4 destinée aux définitions. Elle est indiquée dans le tableau (I.1) pour le mode de fonctionnement continu ou à demande élevée (MECHRI, 2011).

I.1.4. Notion de niveau d'intégrité de sécurité (SIL)

Les normes de sécurité fonctionnelle CEI 61508 et CEI 61511 définissent une démarche d'analyse du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) d'un système. Elles permettent de définir le niveau SIL qui doit être atteint par un SIS qui réalise la fonction de sécurité suite à une analyse de risque. Plus le SIL a une valeur élevée, plus la réduction du risque est importante.

Les SIS sont classés en quatre niveaux SIL qui se caractérisent par des indicateurs discrets positionnés sur une échelle de un à quatre niveaux (Tableau I.1). Les SILs sont employés pour spécifier les exigences de sécurité des fonctions de sécurité réalisées par des systèmes E/E/EP relatifs à la sécurité selon la norme CEI 61508. Le SIL "4" désigne le degré de sécurité le plus élevé du fait de l'exigence forte de sécurité imposée et le niveau SIL "1" désigne l'exigence la plus faible.

Niveau d'intégrité de sécurité (SIL)	Mode de fonctionnement à faible sollicitation (PFD_{moy})	Mode de fonctionnement continu ou à forte sollicitation (PFH)
4	$\geq 10^{-5}$ à $<10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ à $<10^{-8}$
3	$\geq 10^{-4}$ à $<10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ à $<10^{-7}$
2	$\geq 10^{-3}$ à $<10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ à $<10^{-6}$
1	$\geq 10^{-2}$ à $<10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ à $<10^{-5}$

Tableau I.1 Les différents niveaux de SIL définis par la norme CEI 61508 (IEC 61508, 2010).

L'utilisation des niveaux SIL permet de prendre en compte les défaillances rares mais possibles des systèmes de sécurité en plus des défaillances inhérentes au système opérationnel, menant aux événements dangereux identifiés pendant l'analyse de risque. Les SILs sont attribués aux fonctions de sécurité sur la base de l'étude des défaillances.

La norme CEI 61508 détaille les prescriptions nécessaires pour répondre aux exigences de chaque niveau d'intégrité de sécurité. Ces prescriptions deviennent plus rigoureuses à mesurer que le niveau de SIL s'élève en vue d'obtenir la probabilité d'une défaillance dangereuse de plus en plus faible.

I.2. Classification des défaillances des SIS

Généralement un système (SIS) peut se trouver dans l'un des quatre états suivants :

- État normal : La fonction de sécurité du système est validée et il n'existe pas de défaillance.
- état normal dégradé : La fonction de sécurité est validé, des composants du système pouvant être défaillants. Le système peut réagir dès l'apparition d'un événement dangereux.
- État de sécurité : Il s'agit d'un état du système pour lequel la sécurité est réalisée. Le système peut converger vers cet état dès qu'une défaillance par exemple d'un ou plusieurs composants se produit. Dans ce cas la défaillance peut être soit détectée, soit non détectée, mais elle n'a pas d'action néfaste vis-à-vis de la sécurité.
- État de défaillance dangereuse : C'est un état du système où la fonction de sécurité n'est plus réalisée, un ou plusieurs composants sont défaillants. Le système entre dans cet état dès qu'un risque d'accident apparaît et le système ne répond pas à une demande d'activation de la fonction de sécurité (MECHRI ,2011).

Il existe plusieurs manières de classification des défaillances, généralement les défaillances peuvent être classées en fonction de leurs causes et de leurs effets (LUNDTEIGEN et RAUSAND, 2006).

I.2.1. Classification des défaillances selon leurs causes

Au sens plus général il existe deux catégories de défaillances :

- Les défaillances aléatoires du matériel (physique) : défaillances survenant de manière aléatoire et résultant de divers mécanismes de dégradations au sein du matériel.
- Les défaillances systématiques : défaillances reliées de façon déterministe à une certaine cause, ne peuvent être éliminées que par une modification de la conception ou du processus de fabrication, des procédures d'exploitation, de la documentation ou d'autres facteurs appropriés (IEC 61508, 2010).
- Les défaillances aléatoires du matériel sont causées par la dégradation liée au vieillissement des composants - défaillances naturelles ou primaires – (HAUGE et *al.* 2006) qui peut être accélérée par des facteurs de stress - défaillances secondaires – (CCPS, 2007 in TORRES, 2009).

Au sens contraire les défaillances systématiques sont causées pratiquement par toute autre cause apart la dégradation tels que : Les défaillances dues à des erreurs de conception, de spécification, d'exploitation, de maintenance et d'installation et les erreurs humaines...etc. (SUMMERS et GENTILE, 2006).

Les défaillances systématiques peuvent entraîner des défaillances de cause commune (CCF = Commun Cause Failure). Ils peuvent également empêcher un composant de remplir sa fonction même quand il est encore capable de fonctionner (fiable).

La CEI 61508 recommande de ne prendre en compte que les défaillances aléatoires dans les calculs de performance des SIS, étant donné que les défaillances systématiques ne peuvent généralement pas être quantifiées. Cependant ; comme HAUGE et *al.* (2006) l'ont souligné, la norme IEC61508 inclut implicitement la quantification de certaines défaillances systématiques dans la méthode de quantification des défaillances de cause commune liées aux matériels (TORRES, 2009).

Selon une étude réalisée par l'UK HSE (Health Safety & Environnemental Agency), sur 34 accidents, ils ont montré que 85% de l'ensemble des défaillances des SIS sont des défaillances systématiques et près 60% de ces défaillances sont dues à des opérations avant l'implémentation de SIS (Figure I.2).

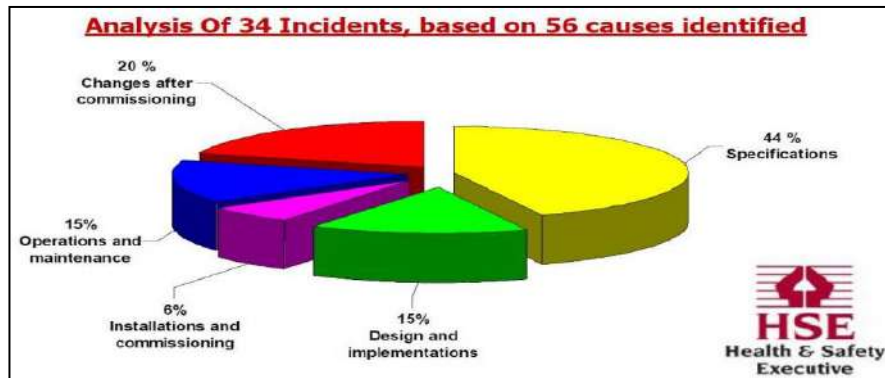


Figure I.2: La répartition des causes des défaillances systématiques selon les normes UK (HSE, 1995 in HONEYWELL, 2017).

I.2.2. Classification des défaillances selon leurs effets sur la fonction de sécurité

Comme mentionné précédemment certaines défaillances des systèmes de sécurité, peuvent conduire à des situations dangereuses et d'autres à des fausses activations, alors les défaillances des SIS (soit aléatoires du matériel ou systématiques), peuvent être classées selon leurs effets en deux catégories :

- 1) Défaillance dangereuse (*dangerous failures*): Défaillance qui a la potentialité de mettre le système relatif à la sécurité dans un état dangereux ou dans l'impossibilité d'exécuter sa fonction.
- 2) Défaillance en sécurité (*safe failures*) : défaillance qui n'a pas la potentialité de mettre le système relatif à la sécurité dans un état dangereux ou dans l'impossibilité d'exécuter sa fonction.

Les défaillances détectées en ligne par test de diagnostic sont qualifiées de défaillances détectées. Celles qui ne sont pas détectées sont qualifiées de défaillances non détectées figure (I.3) Alors la répartition des défaillances et de leurs taux selon la norme CEI 61508 est comme suit :

- Les défaillances dangereuses détectée (Dangerous Detected Failures : DD) : défaillances détectées immédiatement après leurs occurrence par des tests en ligne. Leur taux de défaillance est noté λ_{DD} .
- Les défaillances dangereuse non détectée (Dangerous Undetected Failures DU) : défaillances qui ne peuvent être révélées que lors des tests périodique hors ligne (de période égale à T). Leur taux de défaillance est noté λ_{DU} .

- Les défaillances en sécurité détectées (Safe Detected Failures : SD). Leur taux de défaillance est noté λ_{SD} .
- Les défaillances en sécurité non détectées (Safe Undetected Failures : SU). Leur taux de défaillances est noté λ_{SU} . (MECHRI, 2011).

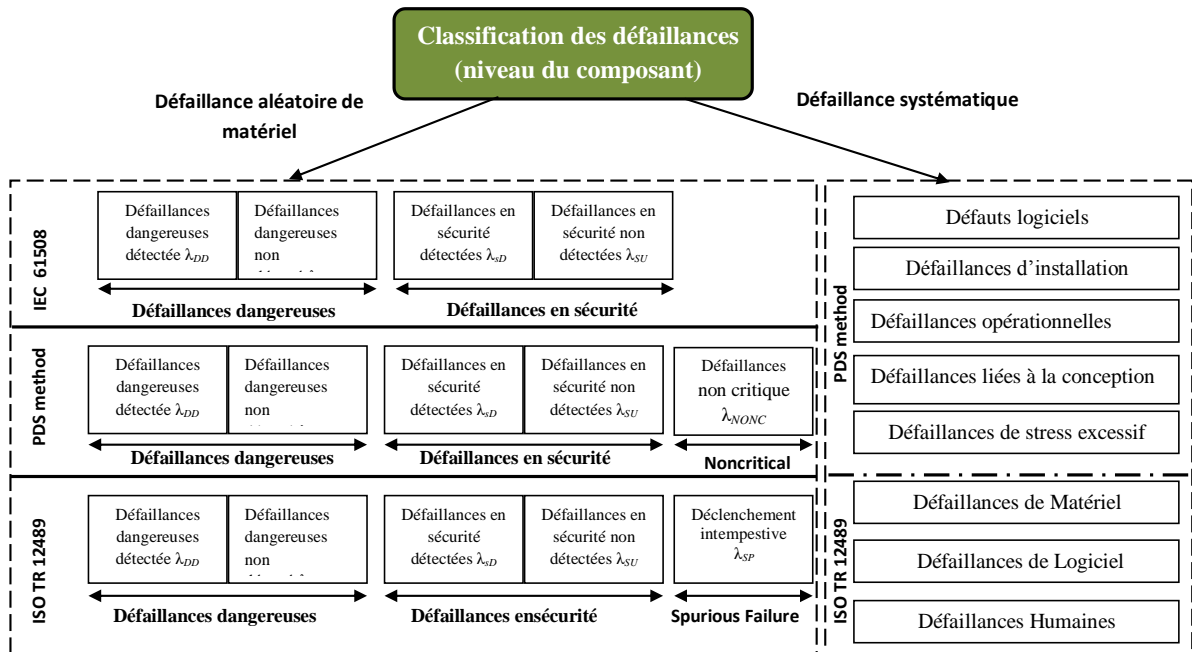


Figure I.3: Classification des défaillances selon les normes et les standards des SIS (Meng Qia, 2019).

En tenant compte de cette décomposition, le taux de défaillance aléatoire du matériel total (λ) comporte deux composantes :

$$\lambda = \lambda_D + \lambda_S \quad (I.1)$$

Avec :

λ_D : taux de défaillance aléatoire dangereux du matériel

λ_S : taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel

La somme des taux des défaillances sûres détectées et non détectée représente le taux de défaillances sûres (λ_S) :

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU} \quad (I.2)$$

La somme des taux de défaillances dangereuses détectées et non détectées donne le taux de défaillances dangereuses (λ_D)

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (I.3)$$

En introduisant la couverture de diagnostic, on peut récrire les différents taux de défaillances, évoqués précédemment, comme suit :

$$\lambda_{DD} = DC \cdot \lambda_D \quad (I.4)$$

$$\lambda_{DU} = (1 - DC) \cdot \lambda_D \quad (I.5)$$

Où : DC représente la couverture de diagnostic des défaillances aléatoires dangereuses.

$$\lambda_{SD} = DC_S \cdot \lambda_S \quad (I.6)$$

$$\lambda_{SU} = (1 - DC_S) \cdot \lambda_S \quad (I.7)$$

Ici, DC_S représente la couverture de diagnostic des défaillances aléatoires en sécurité.

Dans le cas des défaillances de causes communs (CCF) les N canaux constitutifs d'une architecture redondante tombent en pannes simultanément ; pour estimer le taux de défaillance (λ_{DCC}), la CEI 61508 utilise le modèle du facteur β :

$$\lambda_x = \lambda_{xind} + \lambda_{xDCC} = (1 - \beta_x) \lambda_x + \beta_x \cdot \lambda_x \quad (I.8)$$

β_x est le pourcentage des DCC . L'indice « ind » signifie défaillances indépendantes dont l'occurrence n'affecte qu'un seul composant de l'architecture $KooN$, tandis que « x » est utilisé pour rendre compte de la partition précédente des défaillances (DU, DD, SU, SD).

I.3. Maintenance des Systèmes Instrumentés de sécurité

I.3.1. Historique et l'évolution de la maintenance

Dans le contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes.

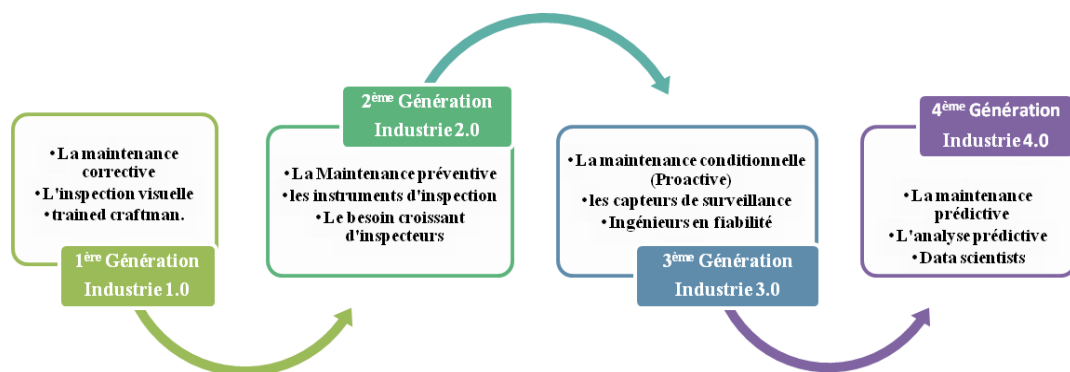


Figure I.4: Évolution de la gestion de la maintenance depuis 1940

Nous plongeons dans l'histoire des stratégies de maintenance, exactement après la Seconde Guerre mondiale, où les machines étaient assez robustes et relativement lentes, les exigences de production n'étaient pas trop sévères, de sorte que les temps d'arrêt n'étaient généralement pas un problème critique et il suffisait d'effectuer une maintenance en cas de panne ou ce que nous appelons une maintenance réactive (l'équipement fonctionne jusqu'à ce qu'il tombe en panne puis réparé). Les machines de ce périodique étaient intrinsèquement fiables. Même aujourd'hui, nous pouvons voir des exemples de machines fabriquées à cette époque qui ont travaillé très dur et sont toujours aussi bonnes qu'au jour de leur fabrication.

A partir des années 1950 avec la reconstruction de l'industrie après la guerre, en particulier celles du Japon et de l'Allemagne, ils ont développé un marché beaucoup plus compétitif ; il y avait une intolérance croissante des temps d'arrêt. Le coût de la main d'œuvre devient de plus en plus important entraînant de plus en plus de la mécanisation et d'automatisation. Les Machines étaient légèrement construites et a fonctionnent à des vitesses plus élevées. Ils s'usaient plus rapidement et étaient considérés comme moins fiables ; les conditions d'exploitation étaient extrêmes pour répondre aux besoins croissants du marché. La production a exigé une meilleure maintenance, ce qui a conduit au développement de la maintenance préventive planifiée. Cette stratégie s'appuie principalement sur un modèle de durée de vie du système qui synthétise une connaissance statistique *a priori* (relative aux temps de panne du système), (GERTSBAKH, 1977). Les remplacements réguliers d'un composant ont été programmés afin d'éviter toute défaillance potentiel.

Durant la moitié des années 1980, une 3^{ème} génération est introduite avec la présence d'un système de surveillance et les technologies de diagnostics qui ont permirent de disposer en temps réel, une information plus précise sur l'état courante du système qui peut conduire à envisager des stratégies de maintenance préventive plus efficaces et par conséquent la maintenance conditionnelle a émergée. C'est avec cette stratégie qu'on peut éviter les actions de maintenance inutiles et par conséquent de réduire les coûts de maintenance superflus (GRALL, 2003), (JARDINE, 2006), (JARDINE, 2013), (THOMAS, 2009).

Cependant, la stratégie de maintenance conditionnelle nécessite d'installer et d'utiliser des équipements de surveillance (KOTHAMASU, 2006), (WANG, 2008). Donc, au début, les stratégies de maintenance de ce type semblaient n'être réservées qu'aux industries à haut risques. Mais les équipements de surveillance devenant moins

onéreux, les stratégies de maintenance conditionnelle sont plus facilement envisagées (BOGUE, 2013).

Dans la dernière décennie, la technique de pronostic, qui est une discipline d'ingénierie focalisée sur la prédiction/prévision du moment où une entité ne sera plus remplir sa fonction requise, est introduite à la prise de décision de maintenance. Une stratégie de maintenance incorporant les pronostics au processus de décision est alors définie : la stratégie de maintenance prévisionnelle (ou proactive) qui permet de diminuer les dérives de qualité du produit, l'insécurité et les coûts directs de maintenance grâce à un meilleur suivi des dégradations et à une meilleure maintenabilité en comparaison avec la maintenance conditionnelle (LEGER, 1999). En outre, elle permet également d'augmenter la disponibilité du système grâce à la réalisation d'interventions anticipées (THOMAS,2009), de diminuer des temps de maintenance, d'optimiser les conditions d'approvisionnement en pièces de rechanges (achat juste à temps) et de saisir les opportunités qui apparaissent lors de la phase d'exploitation d'un système de production (MULLER, 2005).

I.3.2. Management de la maintenance des SIS dans la phase opérationnelle

I.3.2.1 Exploitation et la maintenance des SIS

La phase la plus longue du cycle de vie du SIS est durant la phase de maintenance et d'exploitation; où se produisent la plupart des défaillances. Le maintien d'un niveau élevé de performance du SIS dépend de la conception initiale et de la politique de maintenance adoptée au sein d'une entreprise. Pour cette raison, de nombreuses activités de surveillance et de test spécifiques aux SIS sont nécessaires. Selon l'entreprise Emerson, toutes les hypothèses de conception des SIS doivent être vérifiées à des intervalles réguliers et les SIS doivent être soumis à une inspection régulière et à des tests de validation effectués par des procédures gérées pour garantir que les tests sont effectués correctement, de manière cohérente et en toute sécurité (Emerson, 2016).

En raison de sa nature statique, le SIS doit être inspecté, entretenu et géré correctement et les appareils défaillants doivent être correctement contournés (bypassed), réparés puis remis dans un état pleinement opérationnel, selon (RAFAL, 2016) les bonnes pratiques pour l'exploitation et la maintenance comprend les points suivants:

- Opération : Le SIS est correctement utilisé dans des limites et un intervalle de temps de fonctionnement spécifiées.

- Maintenance : la routine de travail récurrent mis en œuvre pour maintenir le SIS dans sa capacité prévue et à une efficacité optimale.
- La gestion qui est la coordination des efforts des personnes pour atteindre la sécurité, et elle comprend la planification, l'organisation, les compétences, la direction et le contrôle

Bien que la norme IEC 61511 adopte une approche du cycle de vie qui inclut également l'exploitation et la maintenance, l'accent est peu mise sur la manière de garantir que le SIL atteint est maintenu au niveau requis pendant la phase opérationnelle (Martin, 2009).

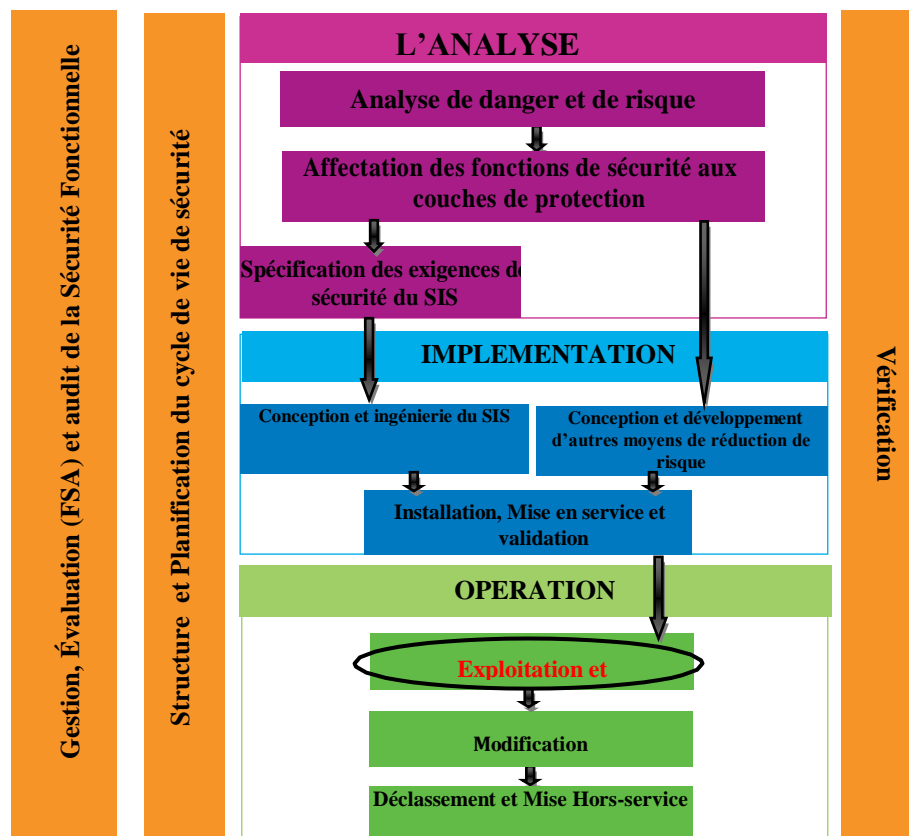


Figure I.5 La phase opérationnelle et de maintenance du cycle de vie du SIS selon la norme IEC61511:2016 (Emerson, 2016).

I.3.2.2. Stratégies de maintenance des SIS en phase opérationnelle

Afin d'assurer et de maintenir le niveau SIL conçu pour un SIF d'un SIS en phase d'exploitation, un programme de suivi est crucial qui comprend les activités suivantes:

- Opération
- Maintenance
- Surveillance
- Gestion des changements

La maintenance du SIS comprend les inspections, la réparation et la révision, les remplacements et les tests fonctionnels. Chaque activité peut être divisée en préparation, exécution, restauration et enregistrement des défaillances (figure I.6).

La maintenance est initiée en cas de défaillance des équipements (maintenance corrective), programmée de manière régulière en fonction du calendrier ou des heures de fonctionnement (maintenance préventive), ou initiée à la demande d'un service de maintenance conditionnelle (Condition based maintenance) (SINTEF, 2006), ou basée sur l'analyse de fiabilité (Reliability centered maintenance).

Le choix des tâches de maintenance pour un composant donné est décrit dans les exigences spécifiques de la sécurité (SRS) :Safety Requirements Specifications) et le système de maintenance (MARTIN, 2014).

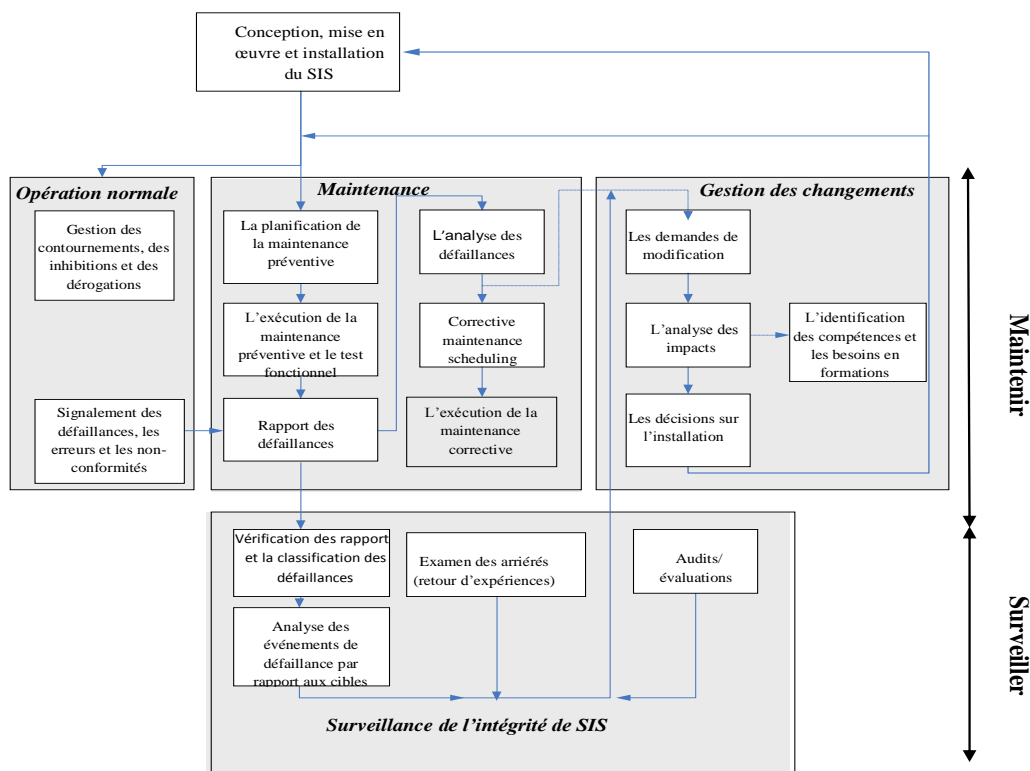


Figure I.6 les activités de suivi des SIS dans la phase opérationnelle (SINTEF, 2006).

I.4.2.2.1. Maintenance préventive:

Les premières étapes lors de l'exécution de la maintenance consistent à planifier et à exécuter la maintenance préventive (MP) et les tests fonctionnels.

La maintenance préventive est souvent nécessaire pour prolonger la durée de vie utile de l'équipement. Elle est généralement effectuée sur la base des recommandations du

fabricant et de l'expérience de l'utilisateur avec l'équipement dans des environnements d'exploitation similaires.

La maintenance préventive se décline en trois sous-types normalisés: la maintenance préventive à caractère systématique (Predetermined Maintenance), conditionnelle (Condition Based Maintenance) et prévisionnelle (Predictive Maintenance) (CEN - EN 13306) Ces trois types sont présentés comme suit :

- **La maintenance préventive à caractère systématique** consiste à planifier les interventions en fonction d'un calendrier défini à l'avance, indépendamment des événements qui surviennent. Ce calendrier est basé sur la durée moyenne de fonctionnement des sous-systèmes par exemple, ou sur un intervalle conformément à une échéance (recommandations constructeurs, par exemple). Il s'agit donc de la maintenance planifiée des biens, conçue pour améliorer leur durée de vie et éviter toute activité de maintenance imprévue (ZILLE, 2009).
- **La maintenance conditionnelle** repose sur les conditions des mesures de paramètres, de déclenchement des alarmes et signalements, en fonction de l'évaluation de paramètres significatifs (seuils prédéterminés) de l'état d'un bien (BENGTSSON, 2004), par exemple, des niveaux de vibration, de bruit, de température, etc., et alerte sur la nécessité d'une opération de maintenance lorsque des éléments annonciateurs d'une défaillance sont observés. Bien que la maintenance conditionnelle soit plus dynamique que la maintenance systématique puisqu'elle considère l'état de santé réel d'un bien, le temps restant avant l'occurrence de la défaillance reste indéterminée avec ce type de maintenance (A. Le Mortellec, 2014).
- **La maintenance prévisionnelle** repose sur des techniques analytiques élaborées afin de réduire à la fois le coût de la maintenance et les temps d'arrêt d'un bien grâce à l'identification précoce (prévision) des défaillances imminentes du bien (DELOUX, 2008). Ce type de maintenance part du principe que la maintenance la plus efficace est celle qui est réalisée au plus juste avant la panne, ni trop en avance, ni trop tard. Elle peut être qualifiée de maintenance « prédictive » si elle repose sur la projection des évolutions de paramètres surveillés dans le futur.

I.3.2.2.2. Tests des SIS

La norme (IEC61511, 2016) exige que l'ensemble du SIS soit testé, y compris le ou les capteurs, l'unité logique et le ou les éléments finaux (par exemple, les vannes d'arrêt et les moteurs) afin d'assurer une pleine couverture des défaillances d'un SIS. De nombreux types de tests sont développés qui peuvent être classés en fonction du mode de sollicitation (en ligne ou hors ligne):

- Les tests de diagnostic en ligne (on–line diagnostic-self diagnostic-); sont des tests en ligne qui détectent essentiellement les défaillances aléatoires d'un composant, d'un module de système, ils sont le plus souvent exécutés dès la mise sous tension, puis périodiquement.
- Les tests périodiques ou tests d'inspection (proof test): Tel que défini par la norme, un proof test est un test périodique effectué pour détecter les défaillances dangereuses cachées (DU) dans les SIS afin que, si nécessaire, une réparation puisse remettre le système dans un état «comme neuf» ou aussi proche que possible de cette condition, ce qui est évidemment pas toujours le cas. Certaines demandes sont des événements dangereux et peuvent se produire de plusieurs façons.

Les tests de validation sont souvent effectués dans des conditions différentes des conditions de demande réelles et peuvent donc ne pas être totalement réels (Noureddine Asklou, 2020). Les tests périodiques sont exécutés hors ligne et doivent être différenciés des tests de diagnostics.

Malgré que les termes « tests fonctionnels » et « proof test » sont utilisées de la même chose, la CEI 61508-7 définit les « tests fonctionnels » comme une activité « pour révéler des défaillances pendant les phases de spécification et de conception » (TORRES, 2008).

La fréquence des Proof tests des SIS est planifiée selon les exigences de SRS qui sont les résultats des calculs de PFD avg ou PFH avec l'utilisation de méthodes de calculs des défaillances aléatoire définies dans la norme IEC 61511 pour un certain intervalle périodique (déterminé par l'utilisateur). La fréquence des essais doit être réévaluée en fonction de divers facteurs, notamment les données sur l'historiques des tests, la durée de vie de l'installation et la dégradation du matériel (CEI 61511, 2016).

Pour des raisons pratiques, un test de validation est souvent divisé en sous-tests dans lesquels les différentes parties du SIS sont testées dans des intervalles de test différents (ISA, 2002). Le Proof test peut être mis en application en utilisant plusieurs

stratégies de test différentes. Torres énumère la classification suivante (TORRES-ECHEVERRIA, 2009):

- Le test simultané, tous les n canaux du SIS sont testés en même temps, généralement elle est appliquée dans les arrêts réguliers. Une telle stratégie n'est pas bien accueillie par les industriels car elle nécessite l'arrêt total de l'usine qui peut être programmé pour une durée de trois (03) ans, ce qui correspond à l'intervalle le plus long entre les arrêts de révision des installations pétrolières et gazières (Norwegian Continental shelf (SINTEF, 2006). Les composants du SIS doivent être dans certains cas testés avant les arrêts programmés, de plus, cela nécessite un nombre suffisant de réparateurs pour tester tous les composants du système en même temps.
- Le test séquentiel, où tous les composants redondants sont testés consécutivement l'un après l'autre. Juste après qu'un composant est testé et mis en service, le composant suivant est testé et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les composants du sous-système soient testés.
- Le test indépendant, dans cette stratégie, la durée de test, des composants testés, ne suit pas un programme spécifique, l'intervalle de temps de test entre deux composants est aléatoire (TORRES-ECHEVERRIA, 2009).

Le Proof test peut être partiel (partial Proof) ou complet (full proof). Un full proof test ramènera la probabilité moyenne de défaillance à la demande (PFDavg) de l'instrument à son niveau ciblé d'origine ou proche de celui-ci, tandis qu'un Partial Proof test détecte un pourcentage des défaillances potentielles et il ramènera la PFDavg à un pourcentage du niveau de SIL d'origine. Après un intervalle de temps donné, un full proof test doit être effectué pour ramener l'instrument à son niveau de PFDavg d'origine, le partial proof test aide les industrialistes à proroger la période du full proof test dans le but d'optimisation des coûts (figure I.7).

Par exemple, un full proof test du transmetteur de niveau, peut être réalisé de trois manières:

- Dans la première méthode, le niveau dans le récipient est élevé jusqu'au point d'activation de l'instrument testé, fournissant une preuve fonctionnelle de l'instrument. Le danger de cette méthode c'est que : si l'instrument est un capteur de niveau Critical High (CH) ou High High (HH) pour la prévention des débordements, et qu'il ne s'active pas pendant le test, un déversement est probable. Pour cette raison l'institut américain du pétrole (API) interdit ce type de test.

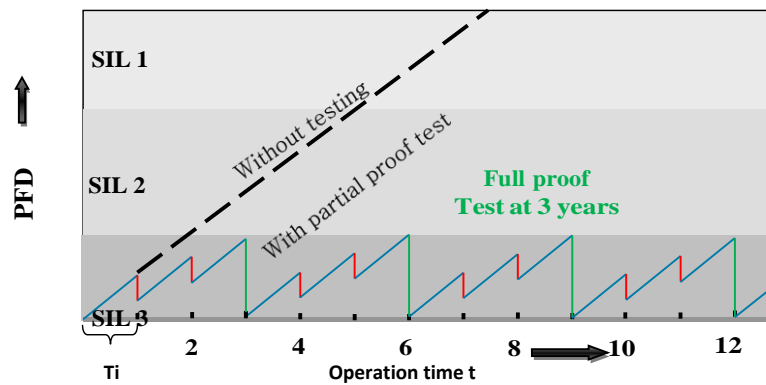


Figure I.7: L'effet de partial proof test sur la PFD avg et la planification de full test (Emerson, 2016).

- La deuxième méthode consiste à retirer l'instrument de la cuve pour le tester dans une cuve similaire en utilisant le matériau du processus (Figure I.8). Le problème avec cette approche est que le processus peut être mis hors ligne, ce qui interrompt le processus de production global. Cela peut nécessiter de la main-d'œuvre pour exécuter le test, et il peut également y avoir des problèmes d'exposition du personnel et/ou de l'environnement aux effets dangereux du matériau manipulé, en plus de l'obligation d'éliminer le matériau utilisé pour le test (Emerson, 2015).

La troisième méthode est le In-situ Partial Proof test, où Switch Level où le transmetteur est sollicité pour s'assurer qu'il n'a pas de problèmes internes et que toutes ses fonctions sont assurées correctement. Dans le proof test partiel, l'instrument de niveau reste installé et le test est effectué via un test de fonctionnement (SHOLETTE, 2015).

Toute anomalie constatée lors du Proof test doit être réparée de manière sûre et rapide. Un test d'épreuve doit être répété une fois la réparation est terminée (IEC 61511, 2016).

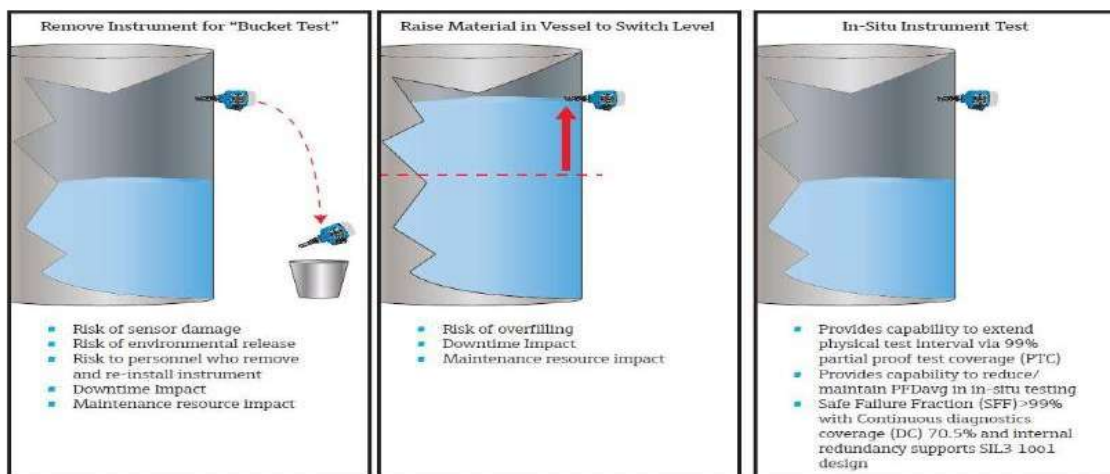


Figure I.8: Proof tests partiales de transmetteur de niveau (EMERSON, 2015).

I.3.2.2.3. Inspection des SIS

L'inspection des composants de SIS est essentielle pour déterminer les problèmes cachés et les conditions dégradées (souvent appelées «maintenance proactive ou condition based maintenance) qui peuvent être non détectés par le proof test, ou peuvent survenir avant le temps du proof test (RAFAL, 2016).

Chaque SIS doit être périodiquement inspecté visuellement pour s'assurer qu'il n'y a pas des modifications non autorisées et qu'aucune détérioration non observable (par exemple, boulons ou couvercles d'instruments manquants, supports rouillés, fils ouverts, conduits cassés, traçage cassé et isolation manquante). Ces problèmes pourraient indiquer une augmentation de la fréquence des défauts (IEC 61511, 2016).

Selon la définition de la norme, il n'y a pas de détails sur la méthode ni sur quel type d'inspection doivent être effectués sur le SIS, sauf le fait qu'elle doit être visuelle pour détecter :

- qu'aucun changement sur le SIS n'est effectué sans être soumis à des procédures de gestion des modifications (MOC),
- la détérioration du SIS causée par des conditions environnementales telles que : température, humidité, poussière/saleté, vibrations...etc.

De plus, il n'y a pas de spécification sur la fréquence de l'inspection, sauf qu'elle est effectuée en même temps que le proof test et qu'elle peut être plus fréquente, en particulier dans des conditions environnementales difficiles.

I.3.2.2.4. Maintenance corrective:

La maintenance corrective intervient après une panne, mais seulement après la détection et la localisation d'un défaut soit suite d'un test de diagnostic, proof test, une inspection ou bien suite à une activation intempestive d'un SIS. Elle a pour objectif de rétablir un bien en état fonctionnel au travers d'opérations de réparations ou de modifications pour rendre ou améliorer soit de manière provisoire ou pérenne le SIS en état de bon fonctionnement. Elle peut prendre soit la forme d'une maintenance palliative soit d'une maintenance curative. (Mobley, 1990), (David J Smith, 2010).

Pour assurer l'amélioration continue de l'entreprise, les informations sur les défauts et les réparations doivent être enregistrées. A titre d'exemple, les données de terrain pourraient être utilisées dans le but d'optimiser l'intervalle de proof test.

I.3.2.2.5. Maintenance centrée sur la fiabilité (RCM: Reliability Centered Maintenance)

Le RCM est un outil d'aide à la décision, cette analyse aide à déterminer qu'elle maintenance doit être effectuée et quels tests et inspections doivent être effectués pour soutenir la stratégie de maintenance (IAEA, 2007). Cette analyse permet d'évaluer l'efficacité d'un test sur le SIL d'un SIS dans la phase opérationnelle en se basant sur une analyse de fiabilité, à l'aide des modèles développés pendant la phase de conception. Les résultats de cette analyse peuvent entraîner une modification des tâches de maintenance préventive existantes et déterminer à quelle fréquence un dispositif doit être testé. Elle permet également, ce qui doit être exactement analysé pendant le test afin d'optimiser les activités d'exploitation et de maintenance des SIS pour l'amélioration la sécurité et la fiabilité d'une installation.

I.4. Contribution des facteurs humains et organisationnels dans la maintenance des SIS

La performance des SIS dans la phase opérationnelle est influencée par plusieurs facteurs, n'est pas seulement par la conception (design) du système, et la stratégie de la maintenance et les tests correspondants, mais aussi par les conditions d'exploitation (opérationnelles) qui constituent une grande partie du système sociotechnique [Martin, 2009]. Ce dernier intègre des éléments humains, sociaux, organisationnels, managériaux et environnementaux, qui jouent un rôle important pour maintenir le SIL exigé pendant la phase opérationnelle.

I.4.1. Procédures et enregistrements de la maintenance des SIS

Les procédures d'exploitation et de maintenance doivent comporter en détail les actions de routine pour prévenir les situations dangereuses ou réduire les conséquences d'événements dangereux tout en maintenant les performances du SIS telles qu'elles ont été conçues, en particulier lorsqu'un système doit être contourné (bypass) pour les tests ou la maintenance. En plus, elles devraient contenir les informations à suivre après l'apparition d'une panne ou d'une défaillance (par exemple, s'assurer que les équipements de test utilisés pendant la maintenance sont correctement calibrés, étalonnés et entretenus). Ces actions sont le résultat d'audits et de tests sur le SIS qui vérifient si une

révision des procédures de maintenance est nécessaire ou non. De plus, ces procédures sont également importantes (IEC 61511, 2016) :

- Procédures de détection des défaillances ;
- Procédures d'analyse des défaillances systématiques.
- Procédures de suivi des performances de maintenance

Les tests périodiques et les inspections du SIS doivent être réalisés en utilisant une procédure pour chaque SIF, afin de révéler les défaillances dangereuses non détectées. Ces procédures et leurs enregistrements doivent être conservés et inclure au minimum les informations suivantes [CEI 61511 ; 2016] :

- Description des tests et inspections effectués, y compris l'identification de la procédure de test utilisée.
- Les dates des tests et des inspections ;
- Nom de la ou des personnes qui ont effectué les tests et les inspections;
- Numéro de série ou autre identifiant unique du système testé (par exemple, numéro de boucle, numéro d'étiquette, numéro d'équipement et numéro SIF) ;
- Résultats des tests et de l'inspection (par exemple, conditions telles que trouvées (as-found) et telles que laissées (as-left), tous les défaillances détectées (y compris le mode de défaillance) et condition as-left.

I.4.2. Staff de Management de la maintenance des SIS

Les employés doivent être correctement formés et d'une manière adéquate sur les procédures d'exploitation et de maintenance du système afin de maintenir les performances fonctionnelles complètes du SIS (matériel et logiciel) et son niveau d'intégrité cible SIL. Pour cette raison, l'amélioration des compétences du personnel en ce qui concerne les tests périodiques est cruciale. D'après (DAVID GREEN, 2016), la formation du personnel sur les tests diffère selon le poste occupé et leur rôle dans le cycle de vie d'un SIS comme suit :

➤ ***Le personnel chargé du développement des procédures du test périodique :***

Ils doivent être compétents dans les concepts de sécurité fonctionnelle et de test, y compris l'ingénierie de base de l'instrumentation et les meilleures pratiques de test de tels dispositifs, en comprenant les implications sur la méthodologie de test en relation avec la couverture de test (PTC).

➤ ***Le personnel chargé de l'exécution (réalisation) du test périodique :***

Le personnel chargé de réalisation des tests périodiques doit être, un personnel qualifié en instrumentation/électricité et doit être formé à :

- La sécurité fonctionnelle et objective du SIF testé pour garantir que les résultats sont correctement enregistrés.
- le fonctionnement de tous les commutateurs de dérivation et dans quelles circonstances ces dérivations doivent être utilisées;
- Le fonctionnement de tout interrupteur d'arrêt manuel et toute activité de démarrage manuel et le moment où ces interrupteurs manuels doivent être activés (CEI 615011, 2016) ;
- Réinitialisation du système et redémarrage du système... etc.

➤ ***Le personnel chargé de la vérification des résultats du test périodique :***

Cette équipe des spécialistes des données et des ingénieurs en fiabilité, ils utilisent les données collectées issues des résultats des tests, les analysent pour extraire les informations nécessaires. Si une modification ou un changement est requis sur le SIS, les examinateurs de test ont le pouvoir d'effectuer les changements requis.

I.5. Modélisation de cout de cycle de vie (LCC) de SIS

Le calcul de cout de cycle de vie (life cycle cost) est essentiel au succès de la mise en œuvre du n'importe quel système de sécurité. Atteindre un niveau de sécurité jugé tolérable est un but crucial mais l'implémentation de système doit respecter le principe d'ALARP qui se base sur la démonstration que l'effort mis pour l'implémentation des toutes les mesures de réductions considérées comme raisonnables pour une réduction supplémentaire de risque n'est pas disproportionné par rapport aux avantages à obtenir (HID, 2003), et que le risque résiduel n'est pas disproportionné par rapport aux avantages à obtenir. Cela se fait généralement par le biais d'une analyse Cout-bénéfice.

Il existe quelques modèles de couts de cycle de vie (LCC) développés spécifiquement pour les systèmes instrumentés de sécurité, le choix du modèle repose principalement sur sa capacité à inclure tous les facteurs pertinents et la disponibilité des données.

Selon (SINTEF, 2006), (LYDERSEN, 2008) et (AARO, 1989) le (L_{CC}) doit inclure pas seulement le cout d'acquisition initial, mais également les couts d'exploitation .Leur modèle générale est le suivant :

$$L_{CC}=L_{AC}+L_{SC}+L_{UC} \quad (I.9)$$

Où :

L_{AC} = Life Acquisition Cost. Cela comprend le coût de l'investissement initial : coût de l'équipement plus, conception, l'installation et la mise en service.

L_{SC} = Life Support Cost. Il comprend des ressources pour l'exploitation et la maintenance, y compris leur coût annuel pendant toute la durée de vie opérationnelle.

L_{UC} = Life Unavailability Cost. La perte de production due au STR est incluse ici. Cependant, les couts prévus dus aux accidents potentiels causés par des situations dangereuses ; c'est-à-dire que le coût d'indisponibilités de sécurité n'est pas inclus ici (TORRES-ECHEVERRIA et al, 2009).

Dans cette thèse on veut minimiser les coûts relatifs aux tests périodiques et les coûts liés aux pertes de production imputables aux déclenchements intempestifs, les concepts utilisés sont les suivants (TORRES-ECHEVERRIA et al, 2009) :

Pour les coûts relatifs aux tests périodiques pour une année de fonctionnement inclus le coût des tests périodiques (C_T) et les coûts de maintenance corrective (C_{CM}):

$$C_{T\&CM} = C_T + C_{CM}. \quad (I.10)$$

Avec :

$$C_T = \sum_{v_{ij}} \frac{1}{TI_{ij}} C_{ij}^T N_{ij} \quad (I.11)$$

$$C_{CM} = \sum_{v_{ij}} f_{ij}^{CM} C_{ij}^{CM} N_{ij} \quad (I.12)$$

TI est la durée entre deux tests périodiques,

f_{ij} est la fréquence de réparation donnée par $f_{ij} = \lambda_{ij}^T$ et λ_{ij}^T est le taux de défaillance total.

C_{ij}^T , C_{ij}^{CM} Sont des coûts relatifs au chaque sous-système *j* de type *i*.

Le cout du taux de déclenchement intempestif est fondamentalement directement proportionnel au cout de perte de production dû à un arrêt intempestif :

$$C_{STR} = STR \cdot C_{SD} \quad (I.13)$$

Où

$$C_{SD} = SD_{TIME} \cdot SD_{LOSS} \quad (I.14)$$

La valeur monétaire change au fil du temps, l'impact de ces changements peut être observable lorsque les systèmes fonctionnent pendant des durées de vie plus longues, dans chaque projet ; il y a des coûts initiaux et des coûts futurs. Pour ajouter plus de précision à l'analyse des coûts du cycle de vie ; deux valeurs sont présentées dans la littérature : La valeur actuelle et la valeur future.

La valeur actuelle de cout de cycle de vie dans notre cas est définie comme suit :

$$LCC_{T\&CM} = (C_{T\&CM} + C_{STR}) PVF \quad (I.15)$$

Où :

$$PVF \text{ (present value factor)} = \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \quad (I.16)$$

Avec, r: le taux d'intérêt et n: nombre des périodes qui représente la durée de vie de système (TORRES-ECHEVERRIA et al, 2009).

Afin de savoir combien d'argent à investir pour payer certaines dépenses futures, Le facteur d'annuité de la valeur actuelle (Present value factor PVF) qui est la somme des valeurs actuelles de tous les paiements, est utilisé pour calculer la valeur actuelle des flux de trésorerie futurs d'un monétaire (De Lira-Flores, 2019) en d'autres termes, il représente le montant d'argent qui doit être investi maintenant afin d'effectuer les paiements futurs requis (William M. Goble, 2010).

Pour la valeur future : La plupart des coûts d'entretien, de réparation et de remplacement auront lieu dans le futur, et comme la valeur d'un monétaire aujourd'hui est inférieure à la valeur de ce même monétaire à l'avenir, un taux d'actualisation est appliqué aux coûts futurs pour les faire correspondre à coûts actuels (Harris et Fitzgerald, 2015).

La valeur future des systèmes instrumentés de sécurité LCC est donnée par l'équation suivante :

$$LCC_{T\&CM} = (C_{T\&CM} + C_{STR}) FVF \quad (I.17)$$

Où:

$$FVF \text{ (future value factor)} = \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad (I.18)$$

Conclusion

Au cours de ce premier chapitre, les différents aspects des concepts clés de notre recherche ont été présentés, à savoir les notions et les concepts de base relatifs aux SIS, leur fonctionnement, les typologies de défaillance et leurs cadres normatifs (précisément la norme CEI 61508 et ses normes filles « sectorielles »).

En suite, nous avons présenté les concepts relatifs au Management de la maintenance des SIS, les stratégies de maintenance de ces dernières, en mettant le point sur l'importance d'optimisation des stratégies de maintenance des SIS sur leurs performances et leurs coût de cycle de vie.

Plusieurs modèles dans la littérature des modélisations, estimations et optimisations des activations intempestives et les performances des SIS ont été développés. Ceci, est considéré comme une initiation pour passer vers un encadrement sur les concepts des activations intempestives des SIS qu'on va essayer de les entourer suite à une recherche exhaustive qui va être résumée au cours du prochain chapitre

Chapitre II

Modélisation et Evaluation quantitative des indicateurs de performances des SIS

Introduction

Les systèmes instrumentés de sécurité qui procurent une couche protectrice dans une installation industrielle, sont souvent utilisés pour réduire le risque résiduel à un niveau jugé tolérable. Le rôle principal de ces systèmes est la détection des situations dangereuses, telles que l'élévation de pression, fuite de gaz inflammable,...etc., pouvant conduire à des accidents majeurs et de mettre ensuite en œuvre un ensemble de réactions nécessaires pour atteindre un état de sécurité de l'installation.

L'activation des SIS dans les processus industriels est effectuée après l'occurrence des déviations spécifiques ou situations dangereuses par rapport au fonctionnement normal. Mais dans certains cas les SIS sont activés en absence de toute déviation ou de demande : il s'agit des activations intempestives.

Le caractère imprévisible de ces activations les rend critiques. Le retour d'expériences sur les déclenchements intempestifs (ST) a montré que leur occurrence conduit à des pertes technico-économiques importantes (perte de production, pollution environnementale importante, pénalité de pollution, coûts de maintenance, coût de redémarrage du procédé, diminution du niveau de confiance du SIS, réclamations clients, etc..). Pour les industriels, il est donc incontestable de réduire au maximum possible ce type de déclenchements. En effet, l'optimisation des performances des SIS constitue un outil d'aide à la décision, que ce soit en ingénierie ou en économie.

Au début de ce deuxième chapitre, nous allons rappeler les définitions, la classification des causes, les types et les effets des activations intempestives. Par la suite un rappel des différentes redondances montrant les différentes architectures au sein des SIS s'avère nécessaire. Nous présentons également les formules analytiques développées dans la littérature, utilisées dans l'estimation des indicateurs de performance des SIS tels que le taux de déclenchement intempestif (STR) et la probabilité de défaillance à la demande (PFD).

L'optimisation de ces indicateurs de performance s'avère indispensable afin de choisir les stratégies les plus optimales de maintenance des SIS. La classification et le processus d'optimisation sont présentés et nous mettons l'accent sur l'optimisation Multi-objectif après avoir présenté un état de l'art sur l'optimisation Multi-objectif des performances des SIS.

II.1. Activations intempestives des SIS

L'activation des SIS dans les processus industriels est effectuée après l'occurrence des déviations spécifiques (situation dangereuse) par rapport au fonctionnement normal (situation normale), mais dans certains cas les SIS sont activés en absence des déviations ou des demandes : il s'agit des activations intempestives.

La première étude *monothématique* qui traite le sujet des défaillances intempestives des SIS est celle présentée par M.A. Lundteigen et M. Rausand, (LUNDTEIGEN M.A. et RAUSAND 2007). Dans cet article, les auteurs utilisent le terme collectif : activation intempestive (*spurious activation*). Dans ce qui suit de cette thèse, nous utilisons le même terme comme générique. Le terme '**activation**' indique qu'il y a une certaine transition d'un état vers un autre et le terme '**intempestive**' indique que les causes du déclenchement sont fausses, incorrects et non-réels. Dans un processus industriel, les activations intempestives des SIS peuvent provoquer des arrêts partiels ou complets des installations, donc il est nécessaire de réduire son nombre d'apparition pour :

- Éviter les pertes de production suite aux arrêts,
- Éviter les risques qui peuvent apparaître durant la phase de redémarrage.

II.1.1. Classification des activations intempestives

Selon la référence M.A. Lundteigen et M. Rausand (LUNDTEIGEN M.A. et RAUSAND 2007), il existe trois différents types d'activations intempestives des systèmes instrumentés de sécurité qui sont :

- **L'opération intempestive (*Spurious operation*)** : une opération intempestive SO est une activation d'un élément du SIS individuellement en absence d'un processus spécifiant la demande d'activation (des déviations réelles).

Exemples :

- Un faux signal sur un niveau élevé émet par un détecteur de niveau dû à une défaillance interne du détecteur.
- Une alarme est émise à partir d'un transmetteur de niveau sans que le niveau de liquide ait dépassé la limite supérieure, en raison de l'échec à distinguer la mousse par rapport au niveau réel du liquide dans un séparateur.

- **Le déclenchement intempestif (*Spurious trip*)** : un déclenchement intempestif est une activation d'un ou plus d'éléments du SIS sachant que la fonction instrumenté de sécurité (SIF) est effectuée en absence d'un processus spécifiant la demande d'activation (des déviations réelles)

Exemples :

- deux détecteurs de flamme dans une configuration 2oo3 (le système fonctionne si au moins 2 composants fonctionnent parmi les 3) donnent un faux signal sur le feu ce qui provoque le déclenchement des éléments finaux et l'activation de la fonction instrumentée de sécurité (SIF).
 - La fermeture d'une vanne d'arrêt d'urgence (ESV) dans une configuration 1oo2 (le système fonctionne si au moins 1 composant fonctionne parmi les 2) des éléments finaux suite à une défaillance interne.
- **L'arrêt intempestif (*Spurious shutdown*)** : un arrêt intempestif est un arrêt partiel ou complet des systèmes en absence d'un processus spécifiant la demande d'activation (des déviations réelles).

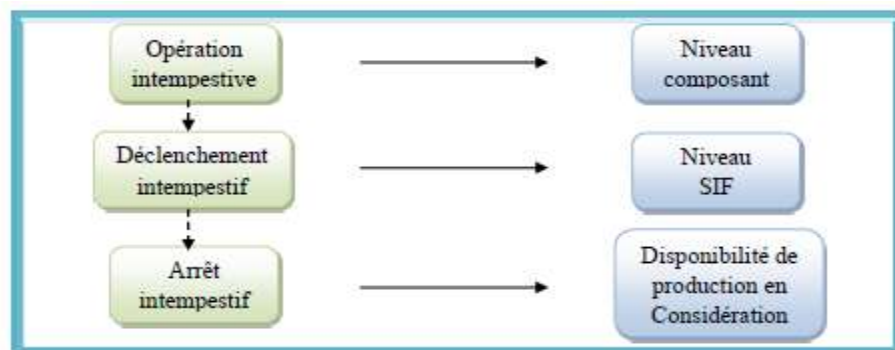


Figure II.1 Les différents types d'activations intempestives.

Selon les définitions précédentes, les différents types d'activations intempestives se réalisent 'en absence d'un processus spécifié la demande d'activation' ce qui nous permet de penser que ces activations des SIS ne concernent que le mode de fonctionnement faible demande. Cette restriction n'a pas de justification, si ce n'est le fait que le domaine de la demande continue, et la *PFH* qui lui est associée, ont été moins largement étudiés que celui de la faible demande et de son indicateur caractéristique, la PFD_{moy} (LUNDTEIGEN M.A. et RAUSAND M, 2008).

La définition suivante est plus étendue que les précédentes : «*Une défaillance intempestive ne peut se définir que par rapport à une fonction de sécurité spécifiée. Elle a pour résultat, soit de déclencher la réalisation de cette fonction de sécurité en l'absence de toute demande, soit d'annihiler l'effet protecteur de cette fonction après son déclenchement réussi*». On remarque que le premier volet de cette définition concerne le mode de fonctionnement faible demande des SIS qui assurent la fonction de sécurité, et que le second concerne le mode de fonctionnement continu.

Autre point à souligner : l'activation intempestive des SIS peut être considérée comme sûre (peut être temporairement), tandis qu'elle est dangereuse. Autrement dit, cela nous conduit à nouveau à affirmer que *les activations intempestives ne constituent pas un sous-ensemble des défaillances sûres, ni d'ailleurs des défaillances dangereuses* (LUNDTEIGEN M.A. et RAUSAND M, 2008).

II.1.2. Causes d'activations intempestives

Des relations de causalité peuvent lier les différents types d'activations intempestives des systèmes instrumentés de sécurité tel que :

- Une opération intempestive peut être l'une des nombreuses causes d'un déclenchement intempestif.
- Un déclenchement intempestif peut-être l'une des causes d'un arrêt intempestif. Ces relations sont illustrées dans la figure (II.2) par des flèches en pointillés.

La figure (1.12) illustre les causes principales d'activations intempestives représentées dans un diagramme de fluence (*influence diagram*).

- **Les causes des opérations intempestives** (figure II.2)

Pour les opérations intempestives SO, on trouve deux causes principales d'activation des éléments du SIS tel que :

- Une défaillance interne de l'élément (ou son support) conduit à une Opération intempestive.
- L'élément d'entrée répond à une fausse déviation.

Les défaillances SO* dues à des défaillances internes sont souvent considérées comme *défaillances en sécurité* car elles ne gênent pas le SIS à l'exécution en demande. Cependant, toutes les défaillances en sécurité ne conduisent pas forcément à des défaillances SO, et il est

donc nécessaire d'étudier les modes de défaillance en sécurité pour chaque élément pour déterminer lesquelles sont pertinents pour les défaillances SO.

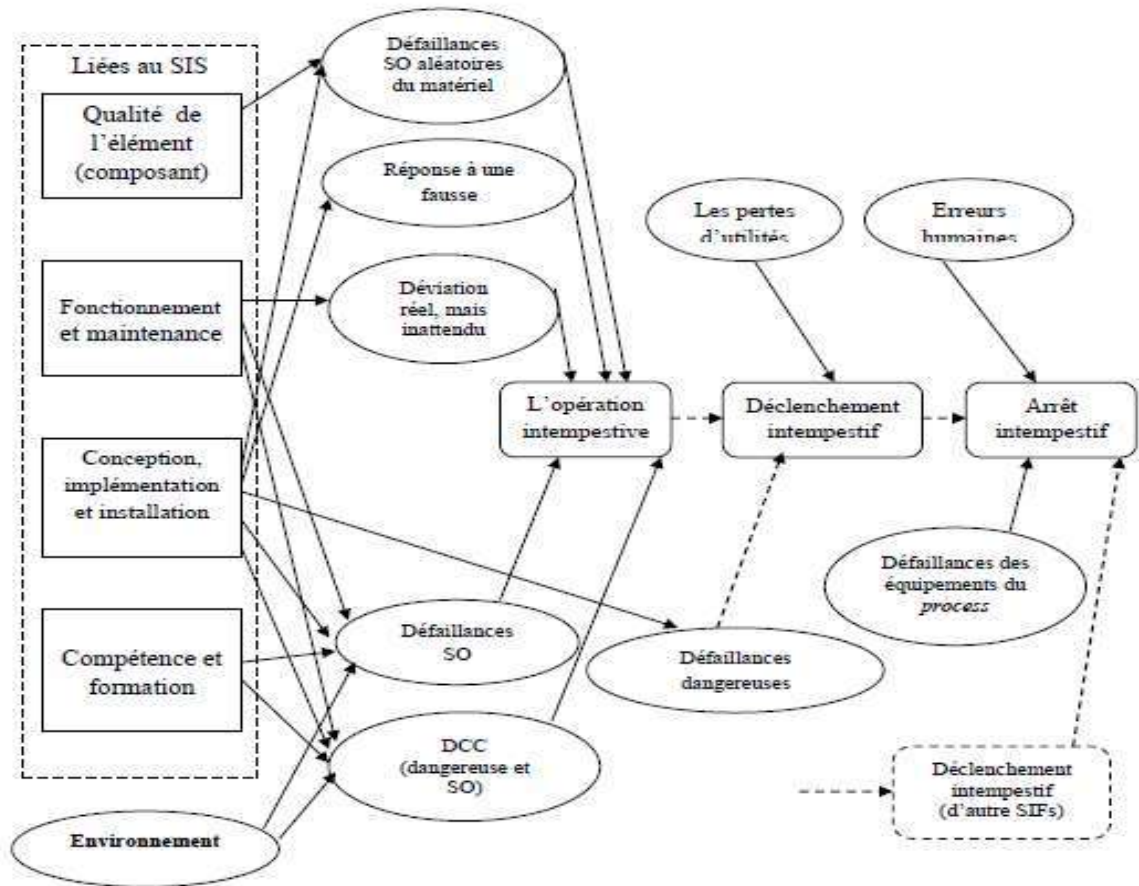


Figure II.2 : les décisions et les facteurs influençant les activations intempestives (LUNDTEIGEN M.A. et RAUSAND M, 2008)

Les défaillances SO figure (II.2) sont distinguées en :

- Défaillances SO aléatoires du matériel dus principalement aux dégradations normales des éléments du SIS et,
- Des défaillances SO systématiques dus aux erreurs de conception, l'insuffisance des procédures,...

La qualité des éléments des SIS influence sur le taux des défaillances SO aléatoires du matériel (illustré par une flèche en figure).

Les procédures d'exploitation et d'entretien, les outils, les méthodes de travail, la conception, l'implémentation et l'installation des procédures, les compétences et la formation, ainsi que l'exposition à l'environnement peuvent influencer sur la probabilité de défaillances systématiques.

Les défaillances de causes communes (DCC) peuvent être aussi l'une des causes des opérations intempestives. Non seulement les DCC dangereuses qui conduisent à des opérations intempestives, mais il est également nécessaire de tenir compte les défaillances SO de causes communes DCC-SO. Ces dernières n'ont pas les mêmes causes que les DCC dangereuses

Les fausses déviations sont des causes importantes qui conduisent aux opérations intempestives des éléments du SIS. Une fausse déviation partage souvent certaines caractéristiques (par exemple, l'aspect visuel et composition) avec une déviation réelle, alors il peut être difficile pour l'élément d'entrée du SIS de distinguer les deux.

Il n'est pas possible de réduire l'apparition des fausses déviations, mais nous pouvons influencer la façon de réponse de l'élément d'entrée du SIS.

Quelques fausses déviations sont provoquées par l'homme, ce qui signifie que nous sommes en mesure d'influencer la façon dont elles se produisent souvent en améliorant les procédures d'exploitation et de maintenance et les processus des travaux.

- **Les causes des déclenchements intempestifs**

L'un des principaux contributeurs aux déclenchements intempestifs est évidemment les opérations intempestives SO des éléments du SIS. SO peut conduire à un déclenchement intempestif si le nombre d'éléments activés correspond au nombre d'éléments nécessaires à l'exécution de la fonction de sécurité. La configuration matérielle choisie détermine donc si les opérations intempestives SO peuvent conduire à un déclenchement intempestif ou non.

Il existe plusieurs d'autres causes des déclenchements intempestifs, telle que les pertes d'utilités, défaillances dangereuses détectées (DD).

- **Les causes des arrêts intempestifs**

Un déclenchement intempestif peut généralement, mais pas toujours, conduire à un arrêt intempestif du processus. Si la fonction instrumentée de sécurité (SIF) du SIS n'a pas un effet direct sur le processus (par exemple, activer d'autres SIFs), le processus peut être en dépit de l'arrêt suite au déclenchement intempestif.

Un arrêt intempestif peut aussi être causé par des défaillances (arrêts) des équipements du processus (équipements qui ne sont pas des éléments du SIS).

Plus de détails sont données dans les références (Rausand, 2008), (Touahar, 2015)

II.2. Modélisation des performances des SIS

La modélisation des performances des SIS consiste à passer du texte vers les équations mathématiques, le problème dans le cas des SIS est de réaliser un compromis entre la sécurité et la disponibilité des installations. Pour cela certaines méthodes ont été développées dans la littérature, tels que les modèles statiques: les diagrammes blocs de fiabilité (DBF) pour les systèmes non réparables, l'Arbres de Défaillances (AdD) qui peut gérer les modèles réparables.

Ces deux modèles permettent de calculer des valeurs instantanées ou moyennes des indicateurs de performances. Mais pour les systèmes dotés de stratégies de réparation sophistiquées ou de dépendances temporelles, d'autre approches basée sur les états, telles que les méthodes de Markov, conviennent mieux aux systèmes à comportements dynamiques (LIU et RAUSAND, 2011).

II.2.1. Redondance au sein d'un SIS et formules analytiques relatives aux indicateurs de performance

Afin de diminuer la probabilité qu'un SIS ne remplisse pas sa fonction de sécurité au moment où il est sollicité, une solution consiste à redonder (totalement ou partiellement) certaines éléments constitutifs de SIS (capteurs, unité logique, actionneurs, éléments terminaux et mêmes les moyens de transmission). A noter que la redondance peut être réalisée

avec des matériels identiques ou de technologies différentes. On distingue plusieurs types de redondance :

- 1) La redondance active : qui est une redondance telle que tous les moyens fonctionnent simultanément pour accomplir une fonction requise.
- 2) La redondance passive qui : est une redondance telle qu'une partie seulement des moyens pour accomplir une fonction requise est en fonctionnement, le reste n'étant utilisé sur sollicitation en cas de défaillance de la partie en fonctionnement.
- 3) La redondance de type KooN : est une redondance dite majoritaire telle qu'une fonction n'est assurée que si au moins K parmi les N moyens (canaux) existants sont en états de fonctionner ou en fonctionnement (THUY LE *et al*, 2008).

Les systèmes basés sur ce principe sont conçus de façon à couper l'énergie (de-Energized) suite à une demande réelle de l'ESD. L'exécution de la fonction de sécurité nécessite l'ouverture des relais (coupure de l'alimentation de la charge). Dans ce cas, les défaillances dangereuses se traduisent par le maintien de l'alimentation de la charge (relais fermés), les relais étant initialement fermés, tandis que les défaillances sûres entraînent l'ouverture des relais.

Les architectures les plus fréquemment rencontrées au sein d'un SIS avec leurs modélisations comme développées dans les références (ANANDA, 2013), (CHEBILA, 2015) et les équations de PFD et STR sont données dans le tableau (II.1):

N°	Architecture	Bloc-diagramme de fiabilité	PFD _{moy} / STR	Formule Analytiques
01	1001		PFD _{moy}	λ_{DD}
			STR	λ_S
02	2002		PFD _{moy}	$2\lambda_{DD}$
			STR	$2\lambda_S^2MDT$
03	1003		PFD _{moy}	$3\lambda_{DD}^3MDT^2$
			STR	$3\lambda_S$

Tableau II.1: Bloc-diagramme de fiabilité relatif aux (a) comportement dangereux et (b) sûrs (à gauche) et le Schéma électrique de 1001/1003/2002/2003 (à droite) (ANANDA, 2013), (CHEBILA, 2015).

II.2.2. Formules analytiques de PFD et STR développées dans la littérature

Les formules analytiques aux indicateurs de performance de SIS des développées dans les littératures sont données dans le tableau (II.2):

Archit ecture	PFD _{moy} / STR	Norme IEC 61508,2010	Approche SINTEF	Approche ISA	Approche Markovienne
1001	PFD _{moy}	$(\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE}$	$\lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2} + \lambda_{DD} \cdot MTTR$	$\lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2} + \lambda_{DU}^P \cdot \frac{T_1}{2}$ $\approx \lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2}$	$\lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \lambda_{DD} \cdot MTTR$
	STR	/	λ_{SU}	$\lambda_S + \lambda_{DD}$	$\lambda_{SU} + \lambda_{SD}$
1002	PFD _{moy}	$2((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^2 t_{CE} t_{GE} + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right)$	$(1 - \beta)^2 \lambda_{DU}^2 T_1^2 / 3 + 2(1 - \beta)\lambda_{DD} \cdot \lambda_{DU} \cdot MTTR + \beta \cdot (\lambda_{DD} \cdot MTTR + \lambda_{DU} T_1 / 2)$	$\left[\lambda_{DU}^2 \cdot \frac{T_1^2}{3} \right] + [\lambda_{DU} \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR \cdot T_1] + \beta \lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2}$	$2\lambda_D^2 \left[\frac{(1 - \beta)\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{(1 - \beta_D)\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR \right] \times \left[\frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} MTTR + \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) \right] + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$
	STR	/	$2\lambda_{SU}$	$2[\lambda_S + \lambda_{DD}] + \beta(\lambda_S + \lambda_{DD})$	$2((1 - \beta_{SD})\lambda_{SD} + (1 - \beta_{SU})\lambda_{SU}) + \beta_{SD}\lambda_{SD} + \beta_{SU}\lambda_{SU}$
1003	PFD _{moy}	$6((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^3 t_{CE} t_{GE} t_{GZE} + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right)$	$0.3 [\beta \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2}] + \frac{1}{4} [(1 - 1.7\beta)\lambda_{DU} \cdot T_1]^3 + 3(1 - 1.7\beta)\lambda_{DD} \cdot MTTR \cdot \beta \lambda_{DU}$	$\left[\lambda_{DU}^3 \cdot \frac{T_1^3}{4} \right] + [\lambda_{DU}^2 \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR \cdot T_1^2] + \beta \lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2}$	$6\lambda_D [(1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU}] \left[(1 - \beta_D)\lambda_{DD} MTTR + (1 - \beta)\lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) \right] \times \left[\frac{(1 - \beta_D)\lambda_{DD} MTTR}{(1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU}} + \frac{(1 - \beta)\lambda_{DU}}{(1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU}} \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) \right] + 3[\beta_D \lambda_{DD} + \beta \lambda_{DU}] \left[(1 - \beta_D)\lambda_{DD} MTTR + (1 - \beta)\lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) \right] \times \left[\frac{\beta_D \lambda_{DD} MTTR}{\beta_D \lambda_{DD} + \beta \lambda_{DU}} + \frac{\beta \lambda_{DU}}{\beta_D \lambda_{DD} + \beta \lambda_{DU}} \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) \right] + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$
	STR	/	$3\lambda_{SU}$	$3[\lambda_S + \lambda_{DD}] + \beta(\lambda_S + \lambda_{DD})$	$3((1 - \beta_{SD})\lambda_{SD} + (1 - \beta_{SU})\lambda_{SU}) + \beta_{SD}\lambda_{SD} + \beta_{SU}\lambda_{SU}$
2002	PFD _{moy}	$2\lambda_D t_{CE}$	$(2 - \beta)(\lambda_{DU} \cdot T_1 / 2) + \beta \lambda_{DD} \cdot MTTR$	$[\lambda_{DU} \cdot T_1] + [\beta \lambda_{DU} \cdot T_1]$	$2[(1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU}] \times \left[\frac{(1 - \beta_D)\lambda_{DD} MTTR}{(1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU}} + \frac{(1 - \beta)\lambda_{DU}}{(1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU}} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) \right] + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$
	STR	/	$\beta \lambda_{SU}$	$2\lambda_S(\lambda_S + \lambda_{DD}) MTTR + \beta(\lambda_S + \lambda_{DD})$	$2(\lambda_{SD} + \lambda_{SU}) \left((1 - \beta_{SD})\lambda_{SD} MTTR_{SD} + (1 - \beta_{SU})\lambda_{SU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR_{SD} \right) \right) + \lambda_{SDCC}$
2003	PFD _{moy}	$6((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^2 \lambda_D t_{CE} + 3(1 - 1.7\beta)\lambda_{DD} \cdot MTTR \cdot \beta \lambda_{DU}$	$2.4\beta \lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2} + [(1 - 1.7\beta)\lambda_{DU} \cdot T_1]^2 + 3(1 - 1.7\beta)\lambda_{DD} \cdot MTTR \cdot \beta \lambda_{DU}$	$[\lambda_{DU}^2 \cdot T_1^2] + [3\lambda_{DU} \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR \cdot T_1] + \beta \lambda_{DU} \cdot \frac{T_1}{2}$	$3[(2 - \beta_D)\lambda_{DD} + (2 - \beta)\lambda_{DU}] \left[(1 - \beta_D)\lambda_{DD} MTTR + (1 - \beta)\lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) \right] \times \left[\frac{(2 - \beta_D)\lambda_{DD} MTTR}{(2 - \beta_D)\lambda_{DD} + (2 - \beta)\lambda_{DU}} + \frac{(2 - \beta)\lambda_{DU}}{(2 - \beta_D)\lambda_{DD} + (2 - \beta)\lambda_{DU}} \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) \right] + \beta_D \lambda_{DD} MTTR + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$

	STR	/	$C_{2003} \beta \lambda_{SU}$	$6 \lambda_S [\lambda_S + \lambda_{DD}] MTTR + \beta (\lambda_S + \lambda_{DD})$	$3 \left[(2 - \beta_{SD}) \lambda_{SD} + (2 - \beta_{SU}) \lambda_{SU} \right] \left((1 - \beta_{SD}) \lambda_{SD} MTTR_{SD} + (1 - \beta_{SU}) \lambda_{SU} \left(\frac{T_1}{2} + MTTR_{SD} \right) \right) + \lambda_{SDCC}$
Approche binomiale					
	$PFD_{moy}(KooN)$	$A_N^{N-K+1} \lambda_{Dind}^{N-K+1} \prod_{i=1}^{N-K+1} MDT_{i001} + \beta \lambda_{DU} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right) + \beta D \lambda_{DD} . MTTR$			$A_N^{N-K+1} = \frac{N!}{(K-1)!}$ $\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$ $\lambda_{Dind} = (1 - \beta) \lambda_{DU} + (1 - \beta D) \lambda_{DD}$ $\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU}$ $\lambda_{Sind} = (1 - \beta_{SU}) \lambda_{SU} + (1 - \beta_{SD}) \lambda_{SD}$ $MDT_{i001} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} . MTTR$ $MDTS_{i001} = \frac{\lambda_{SU}}{\lambda_S} \left(\frac{T_1}{2} + MRTS \right) + \frac{\lambda_{SD}}{\lambda_S} . MTTRS$ MTTR_{SD} : Mean time to restoration for SD failures MRT_S : mean repair time for SU failures
	STR (KooN)	$A_N^K \lambda_{Sind}^K \prod_{i=1}^{K-1} MDT_{i001} + \beta \lambda_{SU} + \beta D \lambda_{SD} .$			

Tableau II.2 Formules analytiques relatives aux PFDmoy et STR des architectures KooN (ISA, 2002), (SINTEF, 2006), (IEC 61508-6, 2010), (INNAL, 2011), (INNAL et al, 2015).

Une comparaison de ces approches montre que la norme IEC 61508 dans ses deux versions [CEI 61508-6, 1998] et [CEI 61508-6, 2009] n'a pas pris en considération les défaillances intempestives. Elle considère que la détection d'une défaillance dangereuse, pour un SIS non redondant (1oo1 et 2oo2) et fonctionnant en mode forte demande, conduit à la mise en arrêt d'urgence (activation de la fonction de sécurité) du système surveillé. La nouvelle version de la norme IEC 61508 (CEI 61508, 2010) va au-delà de cette supposition en considérant qu'elle reste valable même pour les architectures redondantes (1oo2, 1oo3, 2oo3), C'est-à-dire la détection d'une défaillance dangereuse, entraîne l'activation de la fonction de sécurité, si les éléments n'ont pas été restaurés dans le délai moyen de restauration indiqué **MTTR**.

L'organisme SINTEF (SINTEF, 2006) n'utilise pas le modèle du facteur β pour les défaillances de cause commune. Il met en œuvre un nouveau modèle, dénommé facteur β généralisé, moins pessimiste que celui utilisé par la CEI 61508. L'approche ISA (ISA, 2002), ses formules incluent la contribution des défaillances systématiques. Selon cette l'approche

Markovienne, les formules développées dans la norme IEC 61508 ne sont que des approximations optimistes des formules trouvées dans cette approche.

En plus des approches citées au préalable, elle existe d'autres approches qu'on peut résumer dans ce qui suit :

- Les auteurs Lu and Jiang (LIXUAN et JIN, 2007) proposent une approche basée sur un modèle binomial. Cependant, leur objectif est d'estimer les activations intempestives sous différentes stratégies de maintenances. Cette approche prend uniquement les défaillances SO indépendantes.
- Les auteurs Andrews et Bartlett (J.D et L.M, 2005) utilisent un algorithme pour modéliser la contribution des activations intempestives dans une architecture $KooN$. Leur algorithme a pour objectif d'optimiser la sélection de K et N ($KooN$) pour minimiser les coûts du cycle de vie.
- Les auteurs Cho et Jiang (SUNGWHAN et JIN, 2006) proposent un modèle markovien pour estimer le STR mais ne considèrent pas la contribution des défaillances de causes communes (DCC).

Dans le cadre de notre travail, nous avons retenu les formules développées dans l'approche binomiale (TOUAHAR 2015) qui sont liées directement aux causes principales du déclenchement intempestif des SIS (rappelons qu'il y a trois causes principales : l'opération intempestive, les défaillances dangereuses détectées et les pertes d'utilités).

II.3. Optimisation des performances des SIS

II.3.1. Optimisation Mono-objectif et Multi-objectifs

Le mot «optimum» est latin et signifie «l'idéal ultime»; de même, «optimus» signifie «le meilleur». Par conséquent, optimiser signifie essayer de ramener tout ce que nous traitons vers son état ultime (ANTONIO et LU, 2007).

L'optimisation est au cœur de tout problème lié à la prise de décision, que ce soit en ingénierie ou en économie. Le but ultime de toutes ces décisions est soit de minimiser l'effort

requis et/ou maximiser le bénéfice désiré. Les problèmes d'optimisation rencontrés en pratique sont rarement Mono-objectif ; plusieurs paramètres contradictoires à satisfaire sont présents.

L'optimisation Multi-objectif est disponible depuis environ trois décennies, et son application dans les problèmes du monde réel ne cesse d'augmenter. Son but est de chercher à optimiser plusieurs composantes de la fonction objective (ZIDANI, 2013).

Puisque l'effort requis ou le bénéfice souhaité dans n'importe quelle situation pratique peut être exprimé en fonction de certaines variables de décision. L'optimisation peut être définie comme le processus de recherche des conditions donnant la valeur maximale ou minimale d'une fonction.

L'optimisation consiste à sélectionner les valeurs des variables d'entrée d'un problème afin de trouver la solution optimale. Les variables d'entrée sont celles qui peuvent être contrôlées ou modifiées par l'optimiseur. L'optimisation cherche à minimiser ou à maximiser certains objectifs spécifiques du problème en question, qui sont le résultat du problème. Chaque objectif est défini par une fonction objective (BELHOUL, 2015).

La classification de SARKER et NEWTON (2008) illustre un problème de minimisation ou de maximisation. Cette construction est basée sur les caractéristiques principales d'un problème d'optimisation. Les caractéristiques différenciant les problèmes d'optimisation sont liées au nombre d'objectifs (Mono-objectif, Multi-objectif) et de contraintes (inégalité, contrainte d'égalité), le type de variables de conception (c'est-à-dire un entier continu, discret ou mixte) et les propriétés mathématiques de toutes les fonctions (à savoir de la linéarité ou non, convexité et différentiabilité) (figure II.3) ,également peut être liées au type des données utilisés .

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés de plusieurs manières, en fonction de la nature de la fonction, des variables de décision et des contraintes. Ainsi, il est important de savoir situer le problème d'optimisation posé, afin de choisir la méthode appropriée pour le résoudre (ZIDANI, 2013).

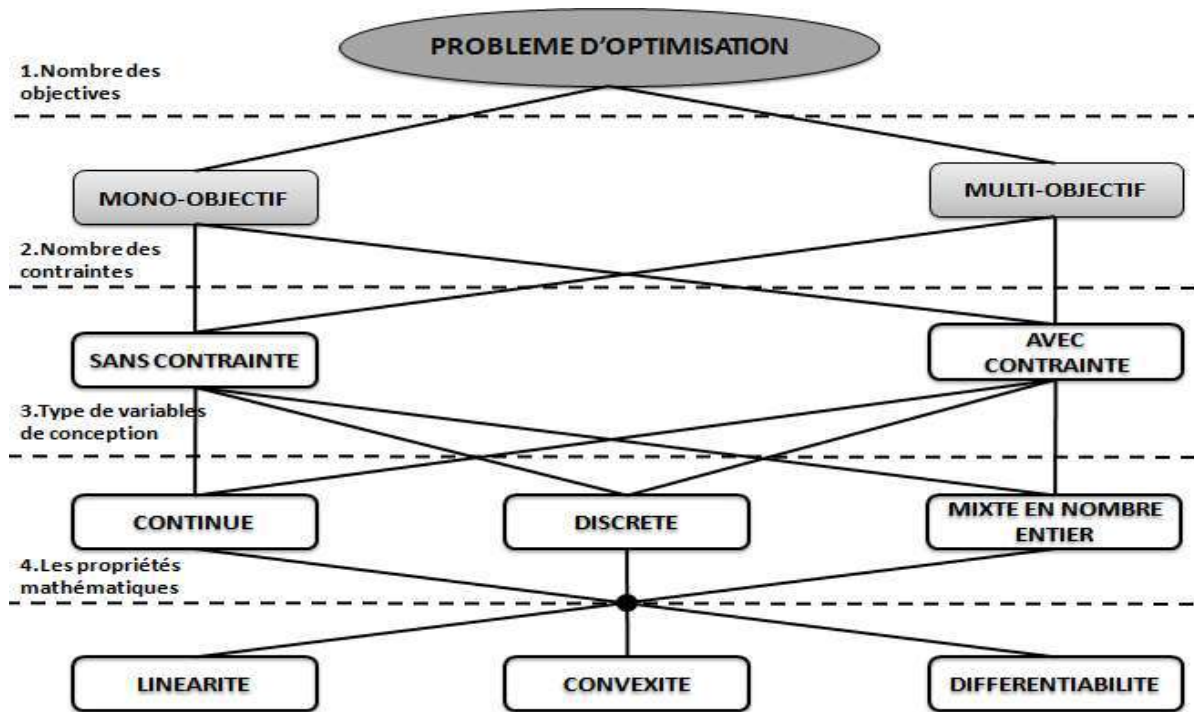


Figure II.3: Classification des problèmes d'optimisation selon SARKER et NEWTON en 2008 (KILLER, 2018).

Dans sa forme générale, un problème d'optimisation mono-objectif noté $P(X, f)$, où f est la fonction objective et X l'ensemble des solutions admissible non-vide ou bien les solutions réalisables. Résoudre le problème $P(X, f)$ revient à trouver parmi les solutions réalisables, une qui minimise ou maximise f , c'est-à-dire dans le cas d'un problème de minimisation, trouver une solution $x^* \in X$ telle que $f(x) \geq f(x^*)$ pour tout élément x dans X . Une telle solution est dite optimale et sera notée $x^*(X, f)$ (BELHOUL, 2015).

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x) \\ \text{sujet à } \begin{array}{l} g_i(x) \leq 0, \quad i=1, \dots, m, \\ h_j(x)=0, \quad j=1, \dots, p, \\ x^L \leq x \leq x^U \end{array} \end{array} \right. \quad (\text{II.1}).$$

Ou $x \in R^n$ est un vecteur de variables de décision, g_1, \dots, g_m et h_1, \dots, h_p sont les fonctions de contraintes d'inégalité et des contraintes d'égalité, respectivement ; et x^L, x^U sont

respectivement la borne inférieure et supérieure du domaine de recherche. Cet ensemble de contraintes définit l'espace faisable C des variables de décision :

$$C = \{x \in R^n / h(x) = 0, g(x) \leq 0 \text{ et } x^L \leq x \leq x^U\} \quad (\text{II.2})$$

Il y a trois grandes familles de méthodes d'optimisation : les méthodes énumératives, les méthodes déterministes, et les méthodes stochastiques.

Un problème d'optimisation Multi-objectifs (MOP) comprend un ensemble de n paramètres (variables de décision), un ensemble de k fonctions objectifs et un ensemble de s contraintes. Les fonctions objectives et les contraintes sont en fonctions des variables de décision. L'objectif d'optimisation est de :

Minimiser :

$$y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_m(x)), m \geq 2 \quad (\text{II.3})$$

Où m est le nombre des fonctions objectifs.

Sous les contraintes :

$$e(x) = (e_1(x), e_2(x), e_3(x), \dots, e_m(x)) \leq 0 \quad (\text{II.4})$$

Où

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in X \quad (\text{II.5})$$

$$y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_k) \in Y \quad (\text{II.6})$$

x est le vecteur de décision, y est le vecteur objectif, X est désigné comme un espace de décision et Y est appelé espace objectif (l'espace des critères) (ZITZLER, 1999).

Les contraintes $e(x) \leq 0$ déterminent l'ensemble des solutions réalisables.

II.3.2. Etat de l'Art sur l'optimisation Multi-Objectif des performances des SIS

Plusieurs travaux ont été développés dans la littérature en utilisant plusieurs techniques d'optimisation des performances des SIS (SALLAK, 2007; SALLAK et al, 2008; Macheri, 2011; Mannan 2012 ; Sung Kyu and Yong Soo, 2013 ; Sukhwinder and Bikram, 2014; Brissaud et al., 2018; Ouazraoui and Nait Said, 2019).

TORRES Echeverria (2009) a proposé deux stratégies d'optimisation des SIS : l'optimisation de la conception de SIS et l'optimisation de maintenance, en particulier la politique de test. La conception du système est améliorée en choisissant le niveau de redondance dans les sous-systèmes du SIS, et en choisissant parmi des composants spécifiques disponibles ayant des spécifications de fiabilité différentes (principes technologiques, taux de défaillance, diagnostic coverage, etc.). Par conséquent, les valeurs de fiabilité disponibles sont des valeurs discrètes. Il existe certaines études dans lesquelles l'allocation de la fiabilité est continue (Salazar et al, 2006). Ceci est cependant difficilement applicable aux cas réels, où les composants doivent être sélectionnés parmi les options disponibles dans le marché. Cela limite la gamme de choix à quelques cas discrets (TORRES-ECHEVERRIA, 2009).

Le test est une activité qui peut grandement améliorer les performances du SIS sans modifier réellement la conception, cela nécessite le choix des stratégies optimales, qui incluent la fréquence de test et ses stratégies. Trop de tests peuvent entraîner des effets négatifs, tels que les temps d'arrêt importants et les événements transitoires qui peuvent augmenter les déclenchements intempestifs. Cela a un impact négatif sur le coût du cycle de vie et sur la confiance que l'opérateur accorde au système de sécurité (TORRES-ECHEVERRIA, 2009).

En effet, Torres-Echeverria et al. (2009a) ont proposé un nouveau modèle pour la quantification de PFD, STR, LCC et l'intègre dans l'optimisation multi-objectifs des Proof test en utilisant les algorithmes génétique et ceci en phase de design des SIS. Un deuxième modèle d'optimisation multi-objectifs pour mentionner l'effet de la diversification de la redondance des simples architectures des SIS basées sur RAMS + C durant la phase de conception a été proposé (TORRES-ECHEVERRIA et al. 2009b).

De plus, TORRES-ECHEVERRIA et al. (2011) propose deux modèles d'optimisation multi-objectifs pour la conception et le test de SIS avec des architectures de type MOON. Le premier modèle consiste à optimiser la conception du système en faisant l'allocation de la redondance et la sélection des composants. Ce modèle permet la quantification de la PFD et la modélisation explicite de la CCF, la couverture de diagnostic et les changements dans le cycle moyen des tests de composants. La quantification de la fiabilité basée sur des modèles de distribution binomiale est limitée à des composants indépendants et identiques. Le deuxième modèle concerne l'optimisation des politiques des tests en ajoutant le voting comme variable

de décision supplémentaire. Les modèles développés ont permis de trouver un compromis entre les indicateurs de performance du SIS, à savoir la PFD_{avg} et le STR et le LCC, et d'assurer une conception efficace du SIS.

La méthodologie d'optimisation appliquée dans les deux cas d'optimisation : l'optimisation de la conception du système avec allocation de redondance et la sélection des composants avec la possibilité de choisir le nombre requis de composants votants (M) nécessaires pour déclencher la fonction de sécurité. L'Optimisation réalisée à l'aide de l'algorithme génétique multi-objectif NSGA-II. Les résultats obtenus ont montré que l'inclusion du niveau de vote (M) comme variable de décision supplémentaire (dans les deux cas d'optimisation) permet d'obtenir le compromis entre les trois objectifs: sécurité, fiabilité et coût.

Par la suite, INNAL et al. (2015), ont proposés une nouvelle formulation analytique pour l'estimation des performances des SIS en termes de PFD_{avg} , PFH, PFS_{avg} et STR valables pour toutes les architectures KooN durant la phase de conception. Une optimisation multi-objectifs basée sur les nouvelles formulations développées des indicateurs sous un ensemble de contraintes PFD_{avg} , STR, le coût d'achat et le coût de test.

YURYREDUTSKIY (YURY, 2017), a proposé l'utilisation d'un modèle Markovien qui prend en compte les événements suivants: pannes et réparations de dispositifs, incidents et restaurations technologiques et maintenance périodique du système. L'approche de modélisation et de conception proposée est utile pour les phases de planification et de conception des infrastructures pétrolières lors de l'élaboration des spécifications du système de sécurité. L'auteur a abordé le problème d'optimisation des mesures de sécurité inhérents aux SIS afin de formuler des exigences simples qui pourraient constituer un point de départ pour la conception technique détaillée et aider les entreprises à affiner le choix des fournisseurs pour les composants des SIS.

En s'inspirant du modèle de TORRES (TORRES, 2009) et fin de décrire l'impact de la diversification de la redondance dans l'optimisation de la conception des SIS basé sur RAMS+C, SILVANA Da Costa et al (SILVANA et al, 2018) ont proposé l'application de ce modèle basé sur la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, la sécurité et le calcul des coûts

à une colonne de distillation en utilisant DUELIST algorithm. Étant donné que la valeur LCC dépend de PFDavg et de STR, les coûts liés à PFDavg et à STR affecteront le résultat de l'optimisation.

En général, le problème consiste à minimiser les objectifs: probabilité de défaillance à la demande, taux de déclenchement intempestif et coût du cycle de vie:

$$Y = f(x) = (\mathbf{PFD}_{avg}(x), \mathbf{STR}_{avg}(x), LCC(x)) \quad (\text{II.7})$$

Où x est un vecteur d'entiers

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (\text{II.8})$$

Sous les contraintes : $L_i \leq x_i \leq u_i$ pour $i = 1, \dots, n$

Le problème est combinatoire (choix des composants), et stochastique (taux de défaillance des composants), C'est donc une optimisation discrète.

II.3.3. Optimisation Multi-objectifs des performances des SIS par les Algorithmes Génétiques (GA : Genetic Algorithm)

Un algorithme d'optimisation est une procédure qui est exécuté itérativement en comparant différentes solutions jusqu'à un optimum ou une solution satisfaisante soit trouvée, l'algorithme génétique fait partie de ce type d'algorithmes évolutionnaires qui fait évoluer les individus dans l'environnement de recherche via des opérateurs stochastiques pour l'obtention des meilleures solutions (TORRES-ECHEVERRIA, 2009).

Les algorithmes génétiques ont été développés à l'Université de Michigan par JOHN HOLLAND (1975) et popularisée par David Goldberg (Goldberg 1998). Ce sont des techniques d'optimisation puissantes, inspirées par le principe de la sélection naturelle et de l'évolution d'espèces élaboré par Charles Darwin.

En raison de leur robustesse et personnalisation facile, les AG ont été appliqués avec succès dans un éventail de problèmes, y compris plusieurs problèmes d'optimisation complexe.

En raison de leur parallélisme inhérent, les algorithmes génétiques (GA) ont le potentiel de trouver plusieurs solutions de Pareto –optimale en une seule simulation. Cette méthode méta-heuristique se base sur le principe évolutif de la survie du plus apte. Ils font partie des techniques de l'intelligence artificielle qui imitent le processus de sélection naturelle et d'évolution vers un ensemble de solutions optimales, en se basant sur des techniques de recherche stochastiques. Les GA sont les plus populaires dans ce domaine (TORRES-ECHEVERRIA, 2009).

Généralement le problème de modélisation et d'optimisation par GA repose sur deux caractéristiques principales (OTSMANI et al, 2011) :

- Définition d'un génotype, correspond à la structure qui représente le codage d'une chaîne de solution.
- Optimisation d'une fonction objective, qui évalue la solution d'un individu.

La réalisation de l'AG pour la résolution de notre problème consiste à développer les différentes étapes selon le processus suivant (Figure II.4):

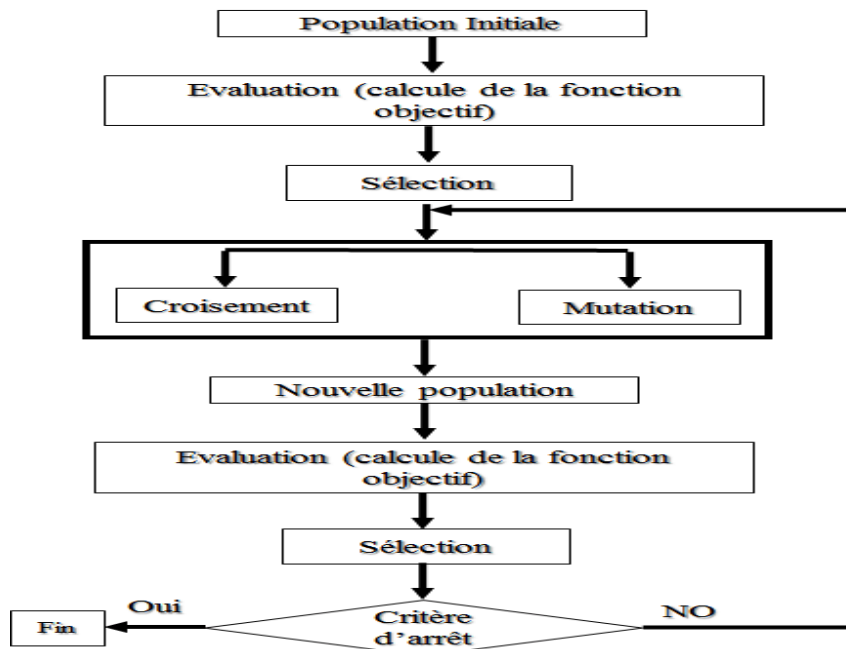


Figure II.4 : Organigramme d'un algorithme génétique (BENDINE, 2016).

GA permet à une population composée d'individus d'évoluer de génération en génération (c.-à-d., par l'application successive des opérateurs de croisement, de mutation et de sélection) à un état qui maximise la qualité de la population (c.-à-d., réduit au minimum les valeurs de la fonction objectif) (HAUPT et HAUPT 1998), (GOLDBERG, 1998).

Ce processus d'évolution continue jusqu'à ce que les critères d'arrêt soient atteints. Dans la formulation pionnière, chaque élément de l'espace de travail décision est codé en binaire, appelé chromosome. Les étapes de croisement et de mutation sont conçues dans une optique d'imitation de la nature : elles consistent en une combinaison et une transformation aléatoire du chromosome. Dans l'étape de la sélection, on compare les nouveaux chromosomes produits et on favorise l'élimination de ceux ayant les mauvaises fitness (par exemple, nous pouvons utiliser la méthode de la "loterie biaisé" qui donne une plus grande probabilité de survie à la meilleure fitness). Ensuite, beaucoup d'approches alternatives ont été introduites. Par exemple, en traitant des fonctions à valeurs réelles, nous pouvons considérer une codification par des nombres réels en utilisant un vecteur de points flottant au lieu de la codification binaire des chromosomes. Dans ce cas, l'opérateur de croisement peut être construit en empruntant le concept de la combinaison linéaire des vecteurs de l'ensemble convexe. L'opérateur de mutation peut consister en une modification déterministe, aléatoire ou hybride de l'élément, comme, par exemple, l'utilisation d'une descente du gradient (JANIKOW et MICHALEWICZ 1991).

Pour faciliter l'usage des algorithmes génétiques, leur déroulement est désormais entièrement supporté par l'outil «*Optimization Toolbox*» de l'environnement MATLAB (MATLAB, 2015).

Conclusion

La prise en compte des problèmes d'optimisation des stratégies de la maintenance des SIS s'impose en raison des conséquences catastrophiques engendrées en cas de défaillance de ces derniers notamment les activations intempestives. Dans cette partie, nous avons rappelé les différents types d'activations intempestives ainsi que leurs causes. Une modélisation des indicateurs de performances des SIS (PFD et STR) par les diagrammes bloc de fiabilité et les formules analytiques permettant l'estimation de ces indicateurs de performance est présenté. Un état de l'art sur l'optimisation Multi-objectif des performances des SIS est établi. Dans le même contexte, l'optimisation Multi-objectif par les algorithmes génétiques est détaillée dans ce chapitre.

Ces rappels servent comme support de base pour l'application de notre approche d'optimisation Multi-objectif des performances des SIS par les algorithmes génétiques, objet du chapitre suivant.

Chapitre III

**Optimisation Multi-Objectifs des
stratégies de maintenance des systèmes
instrumentés de sécurité :**

Étude de Cas.

Introduction

La plupart des études relatives aux SIS sont dédiées à la phase de conception où le SIS n'est pas encore implémenté (Silvana, 2018), (YURY, 2017), (INNAL et al, 2015), ce qui limite la prise de décision sur l'amélioration des performances des SIS, ou la rendre difficile. En effet, certains problèmes surgissent durant la phase opérationnelle et qui ne sont pas pris en considération dans la phase de design tels que les conditions opérationnelles et environnementales, les facteurs de décision pris en considération pour le choix de la stratégie de maintenance comme les facteurs de sécurité, de fiabilité, économiques et de maintenabilité (Y. L. Dong *et al*, 2008), ...etc.

Par ailleurs, certaines installations ont été implémentées avant l'apparition des premiers travaux sur les activations intempestives des SIS en 2008 (LUNDTEIGEN M.A. and RAUSAND M., 2008), (Torres-Echeverria, 2009), (J Riauke and L M Bartlett, 2008) où les déclenchements intempestifs n'ont pas été connus ni pris en considération par les industriels en particulier dans l'industrie pétrolière.

D'où l'intérêt de ce chapitre qui consiste à proposer une approche d'optimisation multi-objectives des performances d'un SIS implémenté dans une installation industrielle mise en service en 2004 du projet de RGTE à In Amenas et de ses coûts de maintenances.

L'approche proposée dans ce travail diffère des travaux précédents par les points suivants :

- La modélisation du SIS sera faite durant la phase opérationnelle,
- L'estimation des indicateurs de performances du SIS est faite en considérant que les composants sont identiques et ces derniers sont réparables et possèdent une configuration complexe,
- L'optimisation des performances du SIS est multi-objectifs sous multi-contraintes.

Afin de valider l'approche proposée, elle a été appliquée à un système d'arrêt d'urgence(ESD) d'une section soufflante opérationnelle de RGTE afin d'améliorer les performances de l'ESD, par la minimisation de la PFD_{avg} , le STR ainsi que le $LCC_{T\&M}$.

III.1. Présentation générale de l'RGTE

Le gaz produit dans le champ D'EDJELEH dans le Bloc 241 était brûlé par la torchère dans dix centres de séparation. Le gaz requis pour le *gas-lift* était amené de Zarzaïtine au champ D'EDJELEH, afin de permettre la récupération des hydrocarbures.

Le projet consiste à récupérer le gaz actuellement brûlé à la torche au champ D'EDJELEH à travers une ligne de 8'' afin de l'utiliser en tant que source de *gas-lift* des puits de pétrole du champ et / ou de l'expédier vers les installations de traitement FGL à Zarzaïtine, à 45 kilomètres au nord des installations du projet par la ligne de 8'' existante d'où il servira à produire de l'électricité.

L'objectif du projet consiste à réaliser ce qui suit :

- Minimisation de torchage du gaz au champ D'EDJELEH conformément aux termes du Partenariat Mondial pour la Réduction des Gaz Torchés (GGFR) dont l'Algérie est partie prenante.
- Récupération et traitement efficace et économique du gaz provenant des centres de séparation D'EDJELEH par compression et déshydratation du gaz récupéré pour l'expédition de gaz de *gas-lift* vers le champ D'EDJELEH et de gaz naturel vers Zarzaïtine.
- Conservation des hydrocarbures et maintien par *gas-lift* des pressions des hydrocarbures dans les roches-réservoirs du Carbonifère et du Dévonien D'EDJELEH.
- Un environnement de travail sûr pour la protection du personnel et des biens.
- La protection de l'environnement.
- L'exploitation fiable des installations.

La première découverte d'hydrocarbure du champ D'EDJELEH remonte à 1956. Situé dans le bassin d'Illizi, à environ 60 km au sud-est d'In AMENAS et 250 km au nord-est

d'Illizi, dans le sud-est de l'Algérie (**figure III.1**). Depuis, la prospection et la mise en valeur continue de ce champ ont conduit à l'exploitation actuelle de la roche-réservoir par 212 puits actifs produisant des hydrocarbures ; le maintien de la pression dans la roche-réservoir est aidée par 55 puits d'injection d'eau (en mars 2005). Les réserves totales sont estimées à : 160,54 millions de m³ d'hydrocarbures et de condensat (1,01 milliard de barils), les réserves récupérées sont estimées à 48,58 millions m³ (305,56 milliards de barils), avec une production cumulée atteignant 38,18 millions m³ (240,14 milliards de barils). (R. B. A, 2005)

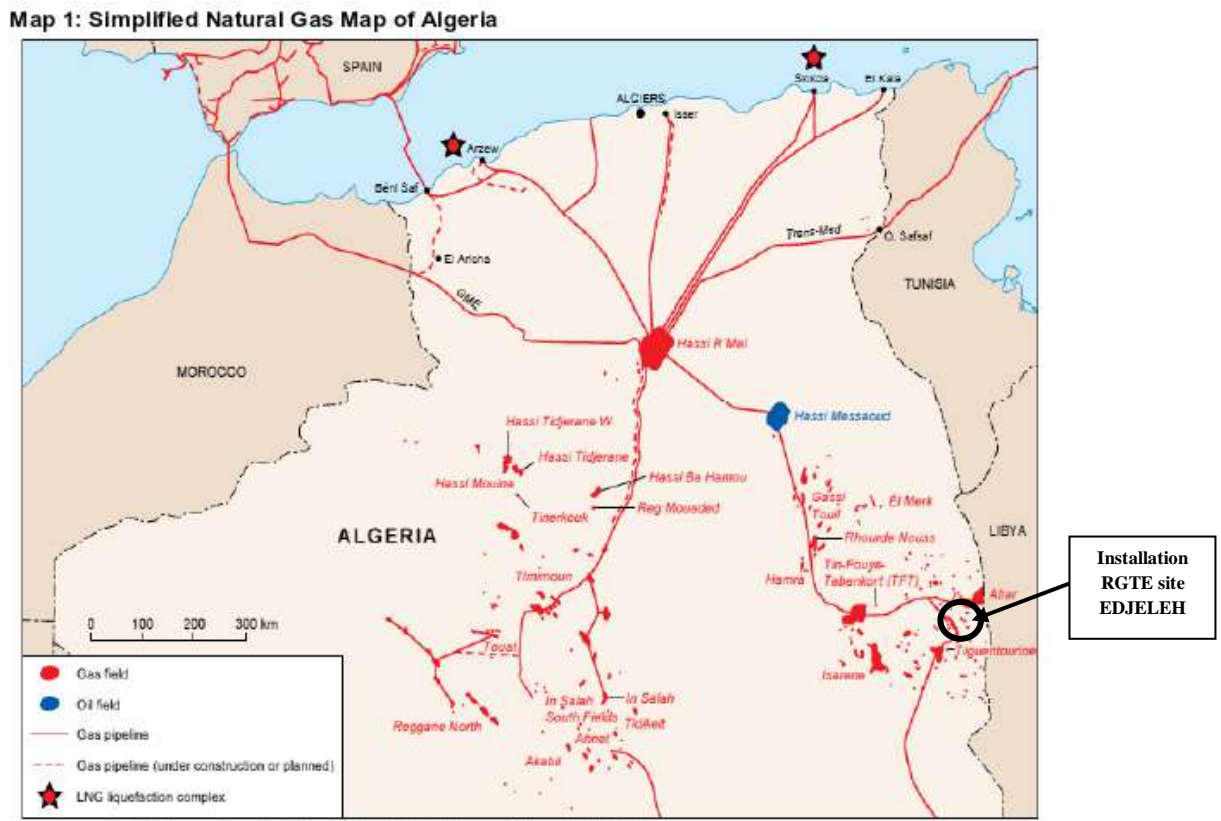


Figure III.1 : Emplacement des installations du projet RGTE à EDJELEH (OUKI, 2019).

Le gaz récupéré des dix centres de séparation du champ D'EDJELEH acheminé vers l'installation de compression. Une partie récupérée du gaz devra être accélérée dans une section soufflante afin d'atteindre le collecteur d'admission de l'installation de compression avec suffisamment de pression. Dans l'installation de compression, le gaz sera comprimé, déshydraté et renvoyé au champ D'EDJELEH.

III.1.1. Description du processus

III.1.1.1. Centres de séparation

Le champ D'EDJELEH comporte 10 centres de séparation (Figure III.2), le pétrole et le gaz des puits sont distribués vers les ballons de séparation, les pressions de séparation des ballons entre 0,4 à 0,6 bar (YOKOGAWA,2003), le gaz séparé est acheminé vers les installations de l'RGTE par un réseau des conduites d'écoulement, l'eau est acheminé vers le bournier et le pétrole vers In-AMINAS par les pompes 50-P2-008-A/B après le stockage dans les bacs 50-R-008-A/B.

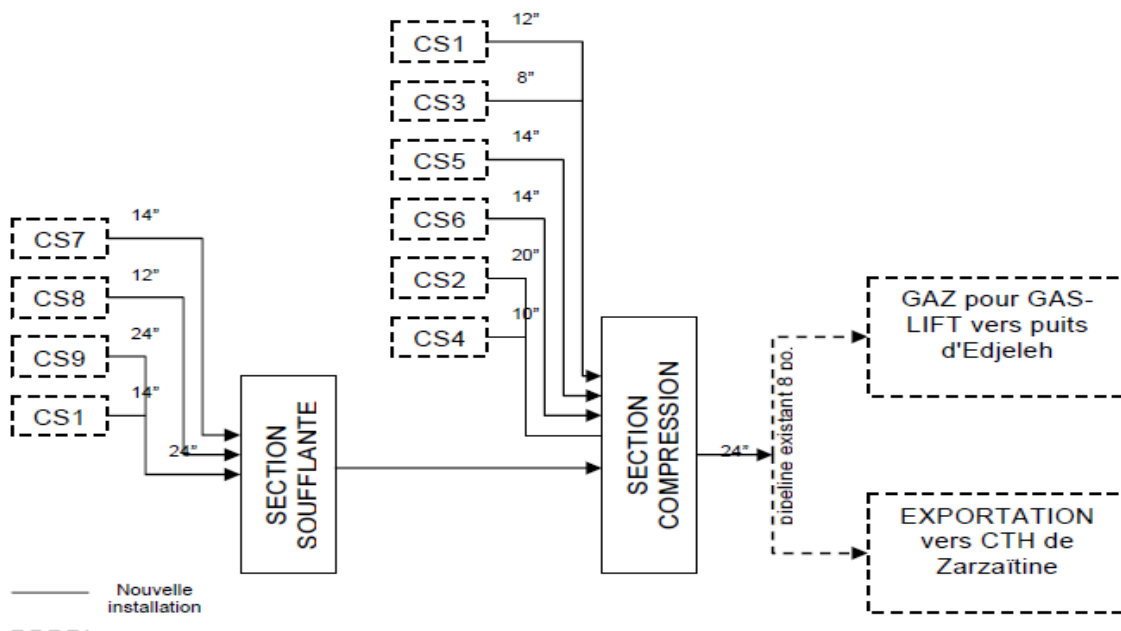


Figure III.2 : Organigramme générale du RGTE

Le gaz du champ D'EDJELEH est saturé d'eau et contient en moyenne 3% de dioxyde de carbone. L'eau et le dioxyde de carbone mélangés peuvent conduire à des problèmes de corrosion dans les conduites et les systèmes du processus. A chaque centre de séparation, de faibles quantités d'inhibiteur de corrosion (Anticorrosion) seront injectées dans le flux de gaz récupéré, saturé d'eau, à l'aide d'une pompe d'injection (figure III.3).

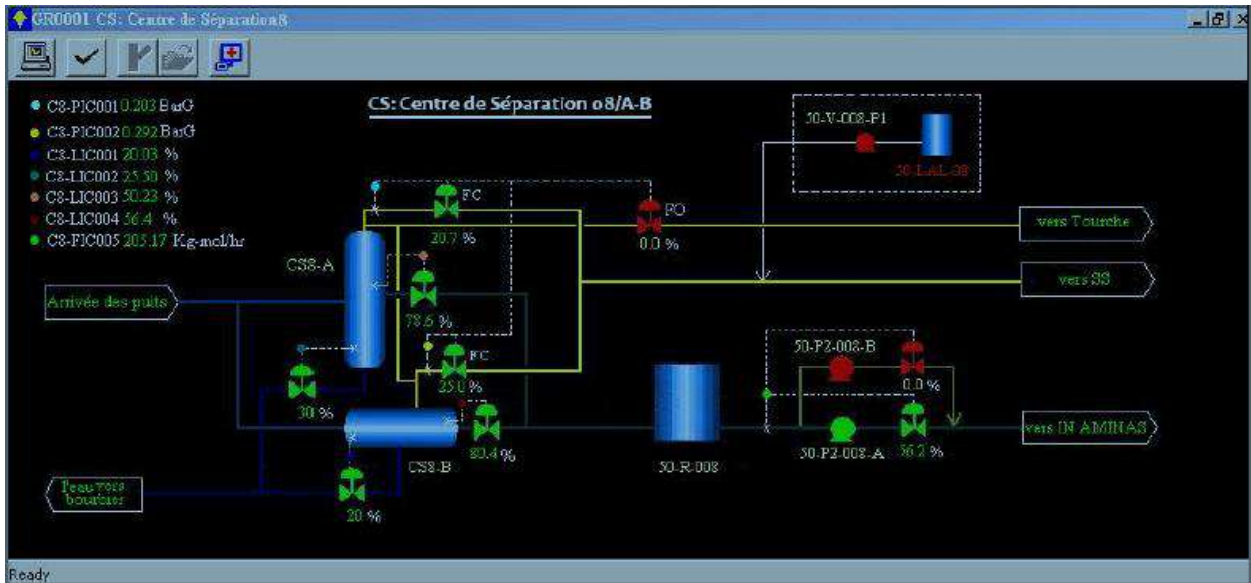


Figure III.3: Centre de séparation N° 8 (Mitsubishi Heavy Industries, 2003).

III.1.1.2. Section Soufflante

Le gaz collecté aux centres de séparation CS7, CS8, CS9 et CS10 est à basse pression (entre 0,30 et 0,40 bars). Il est comprimé par la soufflante (11-K-001) de 0,9 bar à 2,3 bars selon le process suivant : Il est acheminé vers un dispositif antibuée (démister) qui est le ballon de séparation (11-B-001) est un séparateur de type vertical , il peut recueillir des particules de liquide qui pourraient être amené par la ligne de collecte d'aspiration où les condensats éventuellement présents, le flux de gaz est ensuite acheminé vers l'aspiration du compresseur (11-K-001) afin d'être comprimé d'environ 0,9 bars et 16,8 °C (25 °C en été et 10 °C en hiver) à une moyenne de 2,3 bars et 109 °C (2,1 bars, 105 °C en été et 2,8 bars, 114 °C en hiver) (YOKOGAWA, 2003). Il s'agit d'un compresseur centrifuge électrique Mitsubishi d'une puissance de 1284 kilowatts. Au refoulement du compresseur, un inhibiteur de corrosion (11-V-001-P1) est injecté dans le flux de gaz qui est refroidi dans des aéro-réfrigérants (11-E-001) entre 55 et 60 °C. Le flux de gaz est ensuite exporté vers la section compression principale qui comprime le gaz de CS1 à CS10 par l'intermédiaire d'un collecteur de ballon tampon et d'un pipeline de 18"(pouce)

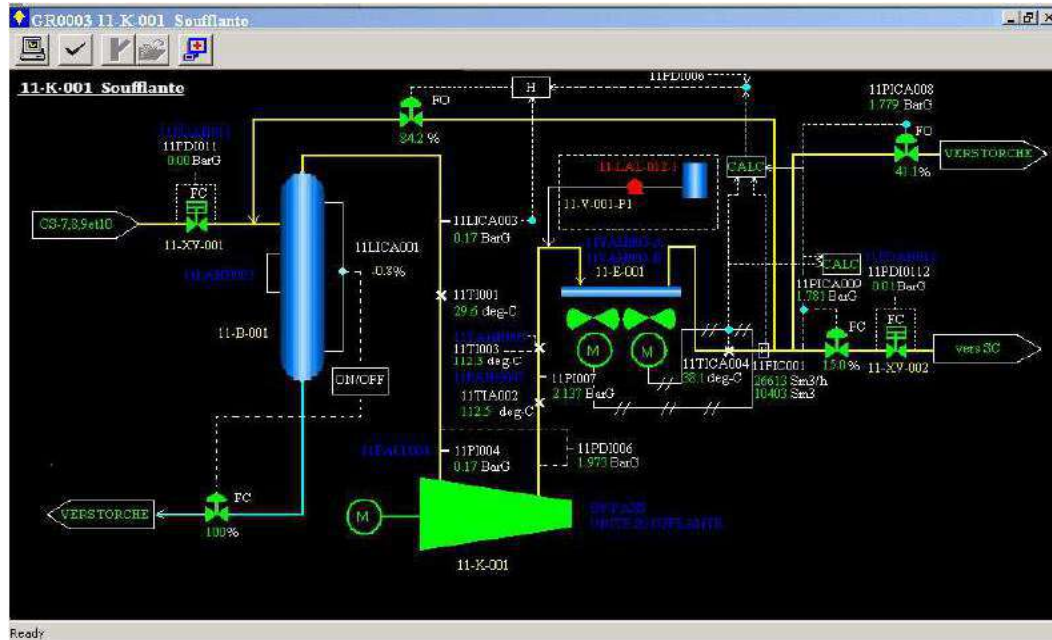


Figure III.4: Soufflante (11-K-001) (Mitsubishi Heavy Industries, 2003).

III.1.1.3. Section Compression (TOUAHAR ,2015)

La section compression va comprimer le gaz récupéré du champ D'EDJELEH depuis une pression de récupération inférieure à 1 bar jusqu'à 65 bars, de façon à ce que ce gaz puisse être envoyé comme gas-lift au champ D' EDJELEH et l'excédent à l'unité FGL de ZARZAÏTINE. Le compresseur fonctionne grâce à une turbine au gaz. Le processus comprend quatre étages de compression successifs, puis le gaz est déshydraté dans une unité de TEG et refroidi avant d'atteindre le manifold à la sortie de l'installation.

III.1.1.4. Description d'un système d'arrêt d'urgence

Emergency ShutDown (ESD) est un type de SIS installé dans l'installation de RGTE. ESD s'assure contre la possibilité de mettre en danger la vie du personnel et d'endommager les installations et les équipements, en déclenchant toutes ou une partie des installations par le contrôle automatique, pour minimiser le risque de dommage consécutif.

Les cas d'arrêt d'urgence des installations de l'RGTE sont listés ci-dessous :

❖ Section soufflante

- Cas 11-1 : arrêt de la 11-K-001 ;
- cas 11-2A : coupure de courant A (L'alimentation électrique principale de SONELGAZ) ;

- cas 11-2B : coupure de courant B (l'alimentation électrique de secours);
- cas 11-3 : manque d'air instrument ;
- cas 11-4 : incendie.

❖ **Section compression**

- Cas 20-1 : arrêt de la 20-K-001/20-KT-001 ;
- Cas 20-2 : arrêt de 20-V-001 ;
- Cas 20-3A : coupure de courant A ;
- Cas 20-3B : coupure de courant B ;
- Cas 20-4 : manque d'air instrument ;
- Cas 20-5 : incendie.

Prenons le cas d'arrêt de la 11-K-001, les causes possibles de l'arrêt du 11-K-001 sont les suivants :

Arrêt du compresseur **20-K-001** (élément de la section de compression) ;

- Niveau du liquide dans le ballon de séparation pour soufflante (11-B-001) HH ;
- Température de refoulement soufflante HH ;
- Pression de refoulement soufflante HH ;
- Pression d'aspiration soufflante LL ;
- Causes mécaniques de la soufflante :
 - Pression du collecteur d'huile de lubrification LL ;
 - Niveau d'huile dans le réservoir d'huile d'étanchéité LL ;
 - Température palier de la soufflante HH ;
 - Température enroulement moteur de la soufflante HH ;
 - Vibration de la soufflante HH ;
 - Position axiale de la soufflante HH ;
- Manque d'air instrument
- Détecteur d'incendie

L'indice HH représente une valeur très haute (HIGH HIGH) et l'indice LL représente une valeur très basse (LOW LOW). On donne comme des exemples : La valeur HH du ballon 11-B-001 est de 35% du volume de ballon (12.3m³) et la valeur de Pression LL d'aspiration 11K-001 est 0.01 bar.

Les anomalies concernant les vibrations et les Positions axiales de la soufflante sont traitées par une autre unité logique qui émet, en cas de déviation, un signal d'information à l'unité logique du système ESD. Cette dernière effectue l'arrêt de la section soufflante.

Les actions réalisées automatiquement dans la section soufflante sont les suivantes :

- Arrêt de la 11-K-001 ;
- fermeture de la vanne d'isolement aspiration du 11-K-001 : 11-XV-001 ;
- fermeture de la vanne d'isolement refoulement du 11-K-001 : 11-XV-002 ;
- ouverture de la vanne de mise à l'air libre du 11-K-001 : 11-PV-008 ;
- ouverture de la vanne d'anti-pompage du 11-K-001 : 11-FV-001 ;
- toutes les vannes de contrôle seront mises en leur position sécurité.

La 11-K-001 est déclenchée et la section soufflante est isolée et dépressurisée par les actions des vannes ci-dessus.

Le système d'huile de lubrification et d'étanchéité de la 11-K-001 ne s'arrête pas et fonctionne de manière continue pour le refroidissement de la 11-K-001 sauf dans le cas de la panne du système d'huile de lubrification et d'étanchéité ou de la coupure de courant.

Les 20-K-001/20-KT-001 ne seront pas déclenchés dans ce cas, la vitesse de la 20-KT-001 sera automatiquement diminuée et la pression du gaz de *gas-lift* sera diminuée aussi au point de 55 Bars.

III.2. Description du problème à optimiser

Cette étude a été consacrée à l'optimisation des performances de système d'arrêt d'urgence (ESD) de la section soufflante de l'RGTE par la minimisation de le PFD_{moy}^{ESD} , STR_{moy}^{ESD} ainsi que le $LCC_{T\&CM}$, tout ça en agissant sur la politique de maintenance d'une part, d'autre part, sur le vote de l'architecture de ce SIS. Avant de présenter le problème à optimiser, on commence par une brève description d'ESD de la section soufflante et ses éléments.

III.2.1. Système d'arrêt d'urgence ESD de la section soufflante

Le système ESD installé dans la section soufflante est un type de SIS fonctionnant en faible demande qui assure, en cas d'activation, l'arrêt total automatique de la section pour minimiser le risque de dommage consécutif. Il est constitué d'un ensemble d'éléments d'entrée (transmetteurs, détecteurs) qui surveillent l'évolution des paramètres physicochimiques représentatifs du comportement du procédé de la section soufflante (température, pression, niveau). Si au moins un de ces paramètres dévie au-delà d'une valeur de consigne et s'y maintient, cette déviation constitue ce qui est appelée demande ou sollicitation. Elle est détectée par les capteurs concernés qui envoient un signal à l'unité logique qui est un automate programmable contrôleur d'un niveau d'intégrité de sécurité SIL 3 de type Triconex Trident Controller.

L'architecture de l'unité logique est basée sur une redondance appelée Triple-ModularRedundant (TMR). Elle est constituée de trois modules de traitement identiques, parallèles et isolés avec l'exécution de diagnostic par une seule carte qui en cas de déviation, donne l'ordre pour réaliser des actions automatiquement. Ces actions sont les suivantes :

- Arrêt de la 11-K-001 ;
- fermeture de la vanne d'isolement aspiration du 11-K-001 :11-XV-001 ;
- fermeture de la vanne d'isolement refoulement du 11-K-001 : 11-XV-002 ;
- ouverture de la vanne de mise à l'air libre du 11-K-001 : 11-PV-008 ;
- ouverture de la vanne d'anti-pompage du 11-K-001 : 11-FV-001 ;

III.2.2. Modélisation du système ESD de la section soufflante

L'ensemble des éléments constituant le système ESD de la section soufflante est regroupé dans le **tableau (III.2)** avec la présentation de l'architecture (de type *KooN*) de chacun de ces éléments ainsi que la définition de ses fonctions dans le procédé.

N°	Élément	Désignation	Type	Architecture	Fonction en procédé
1	11-LSHH-003	L1	Contacteur de niveau à flotteur	1oo1	Détecter le niveau de liquide du ballon de séparation 11-B-001
2	11-LSLL-262	L2	Contacteur de niveau à flotteur	1oo1	Détecter le niveau d'huile d'étanchéité dans le réservoir
3	11-PT-004	P1	Transmetteur de pression différentiel	1oo1	Détecter la pression d'aspiration en amont de la soufflante 11-K-001
4	11-PT-007	P2	Transmetteur de pression	1oo1	Détecter la pression du <i>refoulement</i> de la soufflante
5	11-PT-502	P3	Transmetteur de pression	1oo1	Détecter la pression d'air instrument
6	11-PS-256	P4	Manocontact (pressure Switch)	1oo1	Détecter la pression d'huile de lubrification
7	11-TT-003	T1	Transmetteur de température à résistance	1oo1	Détecter la température de refoulement en aval de la soufflante 11-K-001
8	11-TE-302A	T2	Décteur de température	1oo3 A, B, C	Détecter la température de refoulement en aval de la soufflante 11-K-001
9	11-TE-302B	T3			
10	11-TE-302C	T4			
11	11-TE-303A	T5	Décteur de température	1oo3 A, B, C	Détecter la température de bobinage du moteur 11-KM-001
12	11-TE-303B	T6			
13	11-TE-303C	T7			
14	11-TE-300A	T8	Décteurs de température à résistance	2oo2 A, B	Détecter la température du palier de la soufflante 11-K-001
15	11-TE-300B	T9		2oo2 A, B	
16	11-TE-301A	T10		2oo2 A, B	
17	11-TE-301B	T11		2oo2 A, B	
18	11-TE-310A	T12		2oo2 A, B	
19	11-TE-310B	T13		2oo2 A, B	
20	11-TE-311A	T14		2oo2 A, B	
21	11-TE-311B	T15		2oo2 A, B	
22	11-TE-312A	T16		2oo2 A, B	
23	11-TE-3128	T17		2oo2 A, B	
24	11-TE-313A	T18		2oo2 A, B	
25	11-TE-313B	T19		2oo2 A, B	
26	11-TE-320A	T20		2oo2 A, B	
27	11-TE-320B	T21		2oo2 A, B	
28	11-TE-321A	T22		2oo2 A, B	
29	11-TE-321B	T23		2oo2 A, B	
30	11-TE-330A	T24		2oo2 A, B	
31	11-TE-330B	T25		2oo2 A, B	
32	11-TE-331A	T26		2oo2 A, B	
33	11-TE-331B	T27		2oo2 A, B	
34	11-TE-332A	T28	2oo2 A, B		
35	11-TE-332B	T29	2oo2 A, B		
36	11-TE-333A	T30	2oo2 A, B		
37	11-TE-333B	T31	2oo2 A, B		
38	MP1	MP1	Modules de traitement	1oo3 A, B, C	Récolte l'information de la partie détection, réalise le processus de prise de décision et le transmet aux actionneurs.
39	MP2	MP2			
40	MP3	MP3			
41	11-XV-001	V1	Vanne d'isolement aspiration	1oo1	Fermer pour arrêter l'arrivée du gaz à l'entrée de la section soufflante
42	11-XV-002	V2	Vanne d'isolement refoulement	1oo1	Fermer pour arrêter le retour du gaz à la sortie de la section soufflante

Tableau III.1: Les éléments du système ESD (Touahar ,2015).

III.3. Implémentation des Algorithmes Génétiques et Résultats d'Optimisation

La résolution de notre problème à l'aide des AG consiste à développer les différentes étapes précédemment détaillées dans le chapitre II sur deux stratégies de maintenance :

Première stratégie : Il s'agit dans cette première stratégie d'implémenter une politique de test (T) sans changement de vote d'architecture 'K'.

Deuxième stratégie : Il s'agit d'implémenter une politique de test (T) avec changement de deux paramètres: la période de test (T) et le vote d'architecture 'K'. On note que le changement de configuration affecte les capteurs de température de refoulement en aval de la soufflante 11-K-001, et de bobinage du moteur 11-KM-001 ayant une architecture 1003. Un tel choix est justifié par le fait que ces capteurs sont en redondance et détectent le même point pour chaque équipement, et par le retour d'expérience sont parmi les causes des arrêts intempestives [25].

Les composants de l'ESD sont représentés par un vecteur T_i (chromosome) de 3 gènes où chaque gène présente une période de test de chaque sous-systèmes de l'ESD. Les figures (III.8) et (III.9) donnent respectivement le codage des deux stratégies à optimiser.

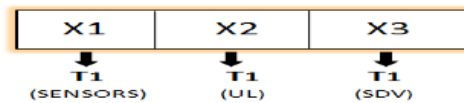


Figure III.6: Codage de la première stratégie d'optimisation.

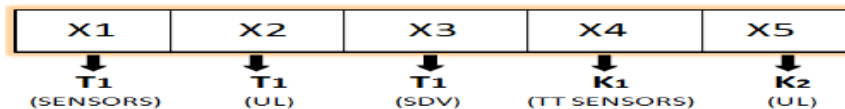


Figure III.7: Codage de la deuxième stratégie d'optimisation

Pour chaque stratégie d'optimisations proposée les problèmes suivants sont résolus :

1er cas : Optimisation multi-objectifs de PFD_{moy}^{ESD} , STR_{moy}^{ESD} et $LCC_{T\&CM}$, sans aucune contrainte ;

2ieme cas : Optimisation multi-objectifs de PFD_{moy}^{ESD} , STR_{moy}^{ESD} et $LCC_{T\&CM}$; sous les contraintes : $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$.

La modélisation des performances d’ESD (PFD_{aveg} et STR) est faite en utilisant les formules analytiques développées par l’approche binomiale mentionnée dans le tableau (II.2) du chapitre II, ce qui concerne LCC l’équation (I.14) chapitre I est utilisée.

Notons que :

- les composants des sous-systèmes d’ESD sont non identiques et réparables,
- les composants des sous-systèmes de l’ESD sont répartis sur plusieurs équipements (architecture complexe),
- chaque sous système ESD a son propre intervalle de test,
- les composants de chaque sous-système sont testés en même temps.

Pour faciliter l’usage des algorithmes génétiques, leur déroulement est désormais entièrement supporté par l’outil «*Optimization Toolbox*» de l’environnement MATLAB (MATLAB, 2015).

Les données utilisées sont mentionnées dans le **Tableau** suivant (SINTEF, 2006) :

Sous systèmes D’ESD								
		Capteurs				Logic Unit (PLC)	Shut Down Valve (SDV)	
		Switch Type		Transmitter (Detector)				
		Pressure	Floatlevel	Pressure	Temperature			
Les Données	$\lambda(E-6 / h)$	3,4	3	1,3	2	17,6	5,4	
	$\lambda_D(E-6 / h)$	2,3	1,4	0,8	0,7	8,8	2,7	
	D_{CD}	0,15	0,6	0,6	0,6	6,00E-01	2,50E-01	
	$\lambda_S(E-6 / h)$	1,1	1,60E+00	0,5	1,3	8,80E+00	2,7	
	D_{CS}	0,1	3,00E-01	3,00E-01	0,3	2,00E-01	0,00E+00	
	β_D					1,00E-02	1,00E-01	
	B_s	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,1	
	MTTR(hour)	8	8	8	8	8	8	
	$C_T(\$)$ /Equipment	90				216	108	
	$C_{CM}(\$)$ /Equipment	480				27077	16264	
	$T_1(H)$					4380 8760 13140 17520		
	C_{STR}	SD _{TIME} = 24 h						
		SIS _{LIFE} = 15 ans						
Perte de production = 10306 \$/h ; R = 0,05								

Tableau III.2 : les données relatives aux composants d’ESD de la section soufflante.

Pour ce problème d'optimisation, nous considérons les deux contraintes de coûts de tests périodiques et de coûts de maintenance corrective, estimées par un jugement d'experts (Touahar, 2015) :

$$C_T^{MAX} = 8288.712 ; C_{CM}^{MAX} = 33154.848$$

Les résultats obtenus des deux cas de la première stratégie sont présentés dans le tableau suivant :

L'optimisation multi-objectifs de STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et $LCC_{T\&CM}$							
Variables de decision			Les fonctions Objectifs				
T1 (SENSORS)	T1 (UL)	T1 (SDV)	PFD _{avg}	STR	LCC _{T&CM}	PV LCC _{T&CM}	FV LCC _{T&CM}
A. Sans aucune Contrainte							
1	1	1	0,0085	4,2511E-05	1,1488E+05	1,1924E+06	2,4789E+06
1	3	1	0,0087	4,2511E-05	1,1401E+05	1,1834E+06	2,4602E+06
3	3	1	0,0087	4,2611E-05	1,0979E+05	1,1396E+06	2,3691E+06
3	2	1	0,0086	4,2611E-05	1,1001E+05	1,1418E+06	2,3738E+06
3	3	2	0,0171	4,2637E-05	1,0963E+05	1,1379E+06	2,3657E+06
2	3	2	0,0171	4,2587E-05	1,1063E+05	1,1483E+06	2,3873E+06
1	2	1	0,0086	4,2511E-05	1,1423E+05	1,1857E+06	2,4649E+06
2	3	1	0,0087	4,2561E-05	1,1079E+05	1,1500E+06	2,3907E+06
2	2	1	0,0086	4,2561E-05	1,1101E+05	1,1522E+06	2,3954E+06
1	3	2	0,0171	4,2536E-05	1,1385E+05	1,1817E+06	2,4568E+06
3	3	3	0,0256	4,2663E-05	109614,635	1,1378E+06	2,3653E+06
2	1	1	0,0085	4,2561E-05	111655,43	1,1589E+06	2,4094E+06
3	1	1	0,0085	4,2611E-05	110654,557	1,1486E+06	2,3878E+06
B. Sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$							
3	1	1	0,0085	4,2611E-05	1,1065E+05	1,1486E+06	2,3878E+06
3	3	1	0,0087	4,2611E-05	1,0979E+05	1,1396E+06	2,3691E+06
1	3	2	0,0171	4,2536E-05	1,1385E+05	1,1817E+06	2,4568E+06
1	3	1	0,0087	4,2511E-05	1,1401E+05	1,1834E+06	2,4602E+06
2	3	1	0,0087	4,2561E-05	1,1079E+05	1,1500E+06	2,3907E+06
2	1	1	0,0085	4,2561E-05	1,1166E+05	1,1589E+06	2,4094E+06
3	3	2	0,0171	4,2637E-05	1,0963E+05	1,1379E+06	2,3657E+06
2	3	2	0,0171	4,2587E-05	1,1063E+05	1,1483E+06	2,3873E+06
1	2	1	0,0086	4,2511E-05	1,1423E+05	1,1857E+06	2,4649E+06
3	2	1	0,0086	4,2611E-05	1,1001E+05	1,1418E+06	2,3738E+06
2	2	1	0,0086	4,2561E-05	111007,43	1,1522E+06	2,3954E+06
3	3	3	0,0256	4,2663E-05	109614,635	1,1378E+06	2,3653E+06

Tableau III.3 : Les solutions de Pareto Optimal de la première stratégie

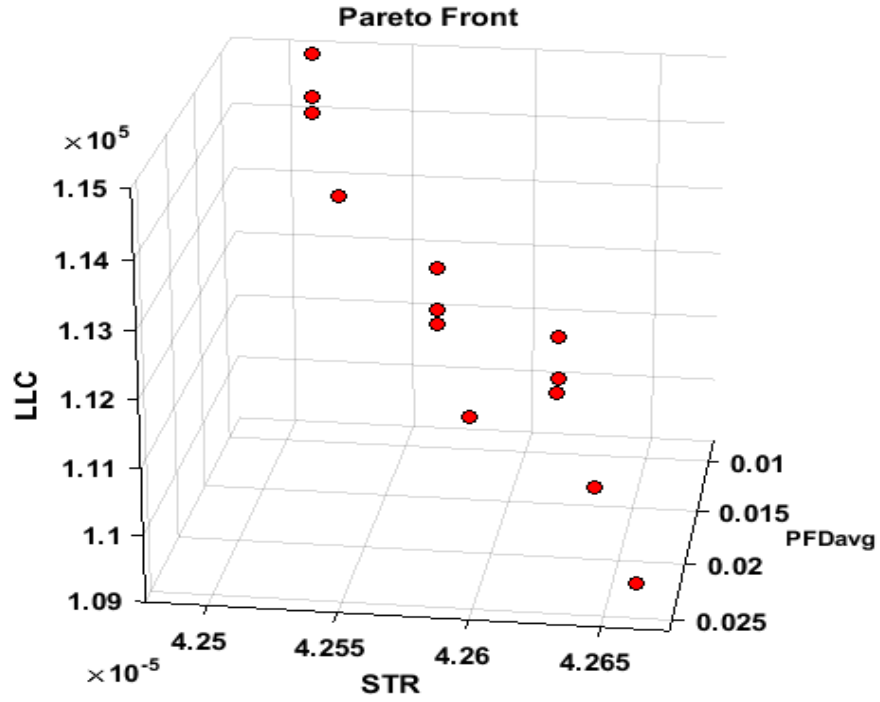


Figure III.8 : Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la première stratégie Sans Contrainte

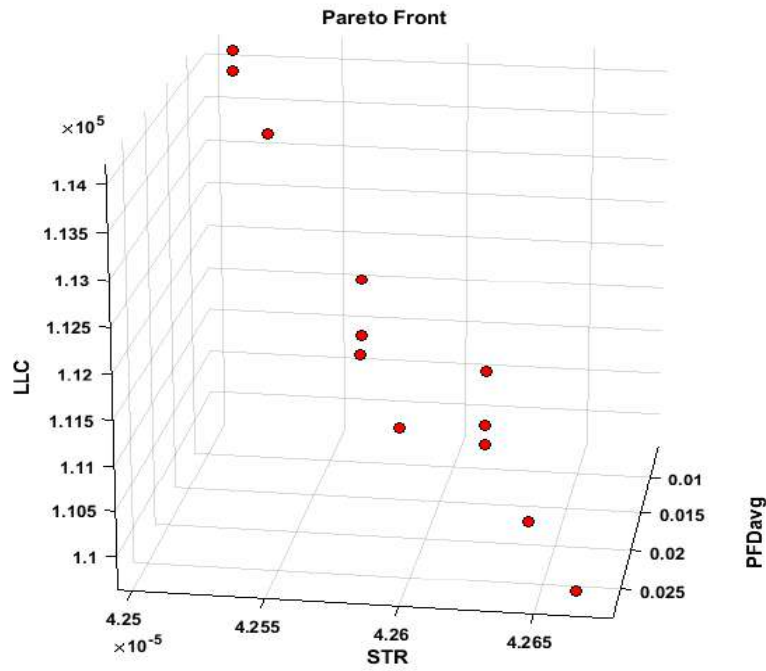


Figure III.9 : Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la première stratégie Sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$

Les résultats obtenus des deux cas de la deuxième stratégie sont présentés au-dessous :

L'optimisation multi-objectifs de STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et $LCC_{T\&CM}$									
Variables de decision					Les fonctions Objectifs				
T1 (SENSOR)	T1 (UL)	T1 (SDV)	K1 (SENSORS)	K2 (UL)	PFD _{avg}	STR	LCC _{T&CM}	PV LCC _{T&CM}	FV LCC _{T&CM}
A. Sans aucune Contrainte									
2	2	1	2	1	0,0086	3,5591E-05	9,5906E+04	9,9548E+05	2,0695E+06
3	3	1	2	1	0,0087	3,5667E-05	9,4744E+04	9,8341E+05	2,0444E+06
1	2	1	2	1	0,0086	3,5516E-05	9,9073E+04	1,0283E+06	2,1378E+06
3	1	3	2	2	0,0256	1,0384E-05	4,0539E+04	4,2078E+05	8,7477E+05
1	3	1	2	1	0,0087	3,5516E-05	9,8857E+04	1,0261E+06	2,1332E+06
1	1	1	2	1	0,0085	3,5516E-05	9,9721E+04	1,0351E+06	2,1518E+06
3	1	1	2	2	0,0088	1,0332E-05	4,0715E+04	4,2261E+05	8,7857E+05
2	1	3	2	2	0,0256	1,0309E-05	4,1485E+04	4,3060E+05	8,9519E+05
3	1	2	2	2	0,0172	1,0358E-05	4,0555E+04	4,2095E+05	8,7512E+05
1	1	3	2	2	0,0256	1,0233E-05	4,4652E+04	4,6347E+05	9,6352E+05
2	1	1	2	1	0,0085	3,5591E-05	9,6554E+04	1,0022E+06	2,0835E+06
3	1	1	2	1	0,0085	3,5667E-05	9,5608E+04	9,9238E+05	2,0631E+06
2	3	1	2	1	0,0087	3,5591E-05	9,5690E+04	9,9323E+05	2,0649E+06
2	1	2	2	2	0,0172	1,0283E-05	4,1501E+04	4,3077E+05	8,9554E+05
1	1	2	2	2	0,0172	1,0207E-05	4,4668E+04	4,6363E+05	9,6386E+05
2	1	1	2	2	0,0088	1,0257E-05	4,1661E+04	4,3243E+05	8,9899E+05
1	1	1	2	2	0,0088	1,0181E-05	4,4828E+04	4,6529E+05	9,6731E+05
3	2	1	2	1	0,0086	3,5667E-05	9,4960E+04	9,8565E+05	2,0491E+06
B. Sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$									
2	1	1	2	1	0,0085	3,5591E-05	9,6554E+04	1,0022E+06	2,0835E+06
2	1	2	2	2	0,0172	1,0283E-05	4,1501E+04	4,3077E+05	8,9554E+05
1	3	1	2	1	0,0087	3,5516E-05	9,8857E+04	1,0261E+06	2,1332E+06
3	3	1	2	1	0,0087	3,5667E-05	9,4744E+04	9,8341E+05	2,0444E+06
2	3	1	2	1	0,0087	3,5591E-05	9,5690E+04	9,9323E+05	2,0649E+06
3	1	1	2	1	0,0085	3,5667E-05	9,5608E+04	9,9238E+05	2,0631E+06
2	2	1	2	1	0,0086	3,5591E-05	9,5906E+04	9,9548E+05	2,0695E+06
1	1	3	2	2	0,0256	1,0233E-05	4,4652E+04	4,6347E+05	9,6352E+05
1	2	1	2	1	0,0086	3,5516E-05	9,9073E+04	1,0283E+06	2,1378E+06
3	1	1	2	2	0,0088	1,0332E-05	4,0715E+04	4,2261E+05	8,7857E+05
3	2	1	2	1	0,0086	3,5667E-05	9,4960E+04	9,8565E+05	2,0491E+06
2	1	1	2	2	0,0088	1,0257E-05	4,1661E+04	4,3243E+05	8,9899E+05
3	1	3	2	2	0,0256	1,0384E-05	4,0539E+04	4,2078E+05	8,7477E+05
1	1	2	2	2	0,0172	1,0207E-05	4,4668E+04	4,6363E+05	9,6386E+05
3	1	2	2	2	0,0172	1,0358E-05	4,0555E+04	4,2095E+05	8,7512E+05
2	1	3	2	2	0,0256	1,0309E-05	4,1485,3272	4,3060E+05	8,9519E+05

Tableau III.4: Les solutions de Pareto Optimal de la deuxième stratégie

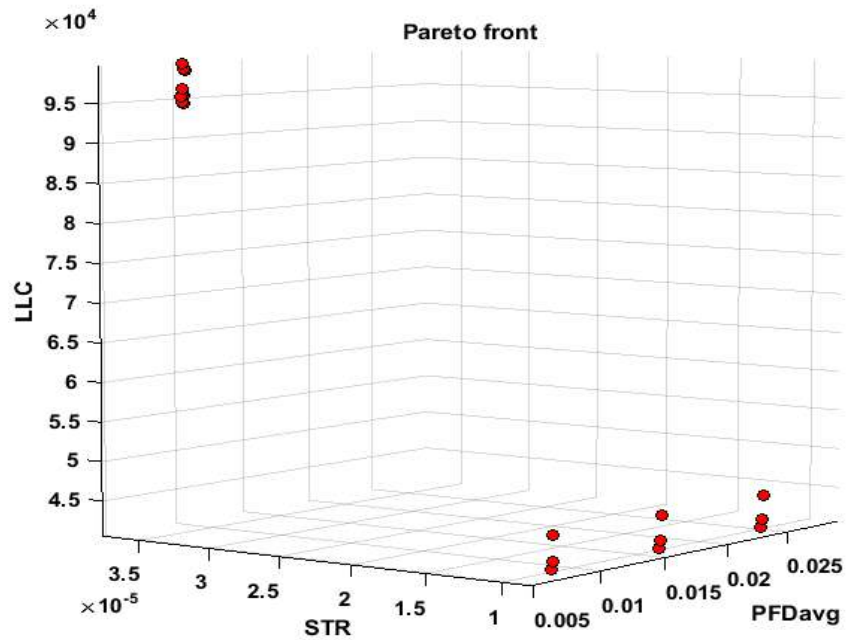


Figure III.10 : Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la deuxième stratégie Sans Contrainte

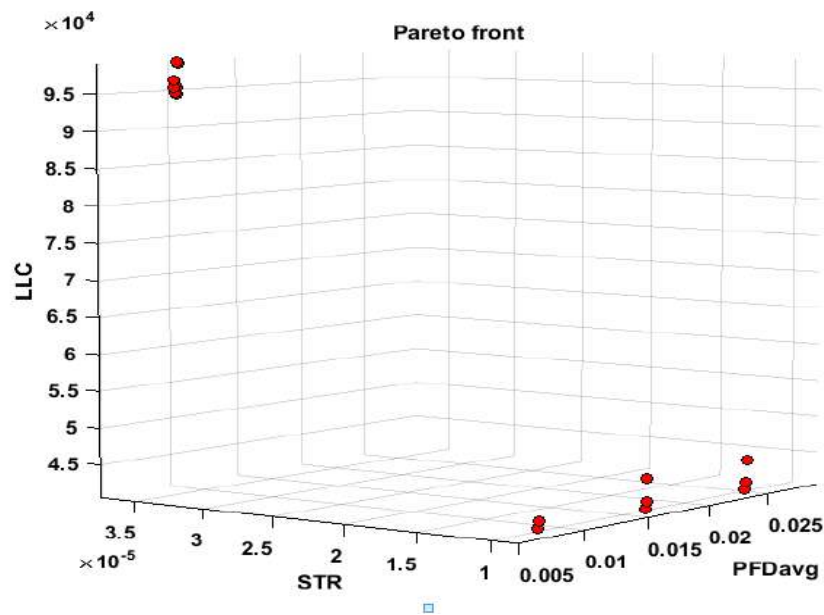


Figure III.11 : Distribution des solutions de Pareto Optimal des deux cas de la deuxième stratégie Sous les contraintes : $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$

Discussion des résultats obtenus :

D'après les résultats obtenus (Tableaux III.4 et III.5), on remarque pour la première stratégie, que les solutions [3 2 1] et [3 3 1] respectivement pour le premier et le deuxième cas, permettent d'améliorer les performances du SIS en minimisant STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et réduire le $LCC_{T\&CM}$ de $1,2 \cdot 10^5$ dollars pour une durée de vie de 15 ans.

Concernant la deuxième stratégie, et pour les deux cas (sans et avec contrainte), il ressort que les solutions [2 2 1 2 2] et [3 1 1 2 2] respectivement pour le premier et le deuxième cas, permettent d'améliorer les performances du SIS en minimisant STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et réduire le $LCC_{T\&CM}$ de $2 \cdot 10^5$ dollars pour une durée de vie de 15 ans.

Par ailleurs, la comparaison des deux stratégies montre que la solution [3 1 1 2 2] peut être recommandée. En effet le changement de voting du sous-système détecteurs de température de refoulement en aval (11-TE-302A, 11-TE-302B, 11-TE-302C, 11-TE-303A, 11-TE-303B et 11-TE-303C) et du sous-système (Logic Solver), en changeant l'architecture de 1003 à 2003 a permis une amélioration importante des performances du SIS et une réduction considérable de LCC de $2,7 \cdot 10^5$ dollars.

Enfin, une analyse détaillée de ces résultats montre que la stratégie optimale recommandée pour l'amélioration des performances du SIS étudié est [3 1 1 2 2]. Cette dernière est obtenue en agissant sur la fréquence des tests des différents sous-systèmes du SIS et le changement de voting des sous-systèmes Sensors et Logic Solver.

Conclusion

L'objectif de ce chapitre est la proposition d'une approche d'optimisation multi-objective des performances des SIS en phase opérationnelle par la minimisation de la $PFDESD_{moy}$, $STRESD_{moy}$ et $LCCT_{\&CM}$ sous la contrainte des coûts de maintenance. Pour cela et afin d'établir un compromis entre ces indicateurs de performance, ce qui permet l'amélioration de la sécurité et de la disponibilité du système, nous avons développés et évalués deux stratégies de maintenance en implémentant une politique de test (T) sans et avec changement de vote d'architecture K des capteurs et de l'unité logique.

Les résultats obtenus montrent que la politique des tests et le voting des architectures des sous-systèmes des capteurs et de l'unité logique du SIS ont un effet important sur l'optimisation des indicateurs de performance du SIS étudié.

Le chapitre suivant est consacré à la minimisation des effets environnementaux (effets torchages) causés par le déclenchement intempestives des SIS installé dans un processus opérationnel par l'amélioration des stratégies de maintenance implémentés.

Chapitre IV

**Minimisation des effets
environnementaux par l'optimisation
Multi objectifs des stratégies de
maintenance des SIS :
Etude de cas**

Introduction

Le changement climatique est un problème qui constitue aujourd'hui un vif débat des experts qui sont convaincus que les risques d'émissions de gaz à effets de serre, notamment de CO₂ pourraient avoir des conséquences encore plus graves sur la qualité de l'air, la santé humaine et l'environnement si aucune mesure de sécurité n'est prise. Le phénomène d'émission est directement lié à l'activité humaine dans le secteur énergétique qui est responsable de 81% des émissions de CO₂ (Baude et al, 2021).

- Entre autre, le Torchage des gaz dans l'industrie pétrolière est une source d'émission très importante de CO₂, l'impact des torchères est une préoccupation locale et mondiale (Zaresharif et al, 2021).Le torchage ou «brûlage des gaz» est l'action de brûler par des torchères des rejets degaz naturel à différentes étapes de l'exploitation du pétrole et du gaz naturel. Cette pratique a un double effet négatif, d'une part sous forme du gaspillage d'une ressource naturelle précieuse et d'autre part sous forme d'émission de dioxyde de Carbone(Co₂), principal gaz à effet de serre (Abiodun, 2021).Le torchage est une pratique courante depuis le début de l'industrie pétrolière, le gaz habituellement présent dans la production pétrolière était traditionnellement considéré comme un inconvénient plutôt qu'une ressource de valeur, le torchage était le moyen le moins coûteux et le plus facile à utiliser pour l'éliminer en toute sécurité (Ogwu,2021), (Kazemimanesh et al, 2021).

En effet, la combustion de gaz à la torche est l'un des problèmes énergétiques et environnementaux les plus difficiles auxquels le monde soit confronté aujourd'hui, que ce soit au niveau régional que mondial. Il s'agit d'un gaspillage de plusieurs milliards de dollars, d'une catastrophe environnementale mondiale persistante depuis des décennies.

Selon la Banque Mondiale (BM) et Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR) ont estimé que le volume annuel de gaz associé brûlé au niveau des torchères et évacué était d'environ 142-150 milliards de mètres cubes (bcm) entre 2019-2020 (Venkatachalam et Milke, 2021).Cela correspond à l'émission de plus de 400 millions de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère, soit l'équivalent des émissions produites par quelque 90-100 millions de voitures (Abiodun, 2021).

Dans le cas de l'Algérie qui est parmi les premiers pays participant à ce problème avec une quantité de 9 milliards de mètre cubes (bcm). Elle est classée le cinquième pays

participant à la pollution par le torchage de gaz dans le monde (GLOBAL GAS FLARING TRACKER REPORT, 2021).

L'entreprise SONATRACH depuis les années soixante-dix, a fixée un objectif de réduire les gaz associés torchés dans ses champs de production selon différents schémas de valorisation du gaz (R. B. A, 2005) :

- Réinjection dans les champs pétroliers pour améliorer la récupération du pétrole brut
- Réalisation de systèmes de gaz lift
- Utilisation des gaz associés comme fuel gaz dans les utilités
- Construction d'un réseau de transport pour collecter le gaz.

Des efforts et des investissements considérables ont été consentis par Sonatrach pour la récupération des gaz torchés à différents niveaux de la chaîne de production. Depuis 2002, Sonatrach s'est associée à un projet de partenariat mondial intitulé «Gaz Flaring Reduction" visant à aider les gouvernements et les Industries pétrolières et gazières dans leurs efforts continus à réduire le torchage et la ventilation des gaz notamment ceux associés à l'extraction du Pétrole.

En 2015 SONATRACH a répondu favorablement à l'invitation du secrétaire général des Nations Unies et le président de la Banque Mondiale, visant à mettre fin au torchage systématique de gaz d'ici 2030 (Zéro Routine Flaring by 2030). L'adhésion à cette initiative, en cohérence avec la réglementation Algérienne sur le torchage, le plan de transformation de SONATRACH 2030 et avec sa politique HSE qui consacre la protection de l'homme, de l'environnement, et des biens et la lutte contre le changement climatique et l'exploitation rationnelle des ressources naturelles comme des composantes essentielles de sa stratégie de développement.

La réduction des risques de torchage à un niveau jugé tolérable est indispensable, elle est souvent obtenue par l'interposition successive de plusieurs barrières de sécurité entre la source de danger, qui peut être un procédé industriel, et les cibles potentielles à savoir les personnes, les biens et l'environnement. Ces barrières incorporent souvent des SIS utilisés pour exécuter des fonctions de sécurité nécessaires à la mise en sécurité des processus industriels après la détection des situations dangereuses. Cependant, l'activation de ces SIS dans les processus industriels est effectuée normalement après l'occurrence des déviations

spécifiques ou situations dangereuses comme expliqué précédemment dans le chapitre II, mais dans certains cas les SIS sont activés en absence des déviations ou de demandes réelles, il s'agit donc des activations intempestives conduisant à des arrêts intempestifs des installations industrielles. Parmi les conséquences de ces arrêts en plus de la perte de production, l'impact environnemental est considérable dans certains cas.

C'est dans cette perspective que s'intègre l'approche développée dans ce chapitre. L'objectif de cette approche est dans un premier temps, analyser et évaluer quantitativement les fréquences de torchage causé par les arrêts intempestifs de l'ESD d'une section soufflante étudiée précédemment dans le chapitre III. L'optimisation des stratégies de maintenance de l'ESD afin de minimiser les effets environnementaux liés au torchage de gaz causé par les arrêts intempestifs de l'ESD est l'objet de la deuxième partie.

IV.1.Cadre législatif et réglementaire Algérien relatif au torchage de gaz

Le cadre législatif et réglementaire constitue une mesure de réduction de phénomène de torchage vue les pénalités environnementales imposées en cas de torchage de gaz. En effet, la législation déploie d'importants efforts sur le plan du droit interne aussi bien que dans le cadre de droit international, pour intensifier les efforts visant à restreindre ces pratiques par le biais de la fiscalité, en se conformant au principe du pollueur payeur.

Dans le cas de notre pays, l'Algérie a pris des engagements juridiques par la ratification de plusieurs conventions visant à restreindre les effets néfastes des émissions de gaz sur l'environnement. Elle est aussi membre de plusieurs partenariats mondiaux pour la réduction de gaz torchés. L'Algérie a ratifiée la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques en 1993 (Ratification 10 avril 1993 J.O n°24 du 21.04 1993 Décret pré.n°93-99), qui met en place un cadre global de l'effort intergouvernemental pour faire face au défi posé par les changements climatiques (Brésil-1992). La convention de Kyoto (Kyoto-1997) dont l'Algérie a fait ratification en 2004 et qui vise la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Décret présidentiel 2004-144). Dans le cadre de l'accord de Paris (Paris-2015) l'Algérie a ratifiée cet accord en Avril 2016 et a développée une stratégie nationale pour renforcer la riposte mondiale à la menace des changements climatiques, dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté (Paris-Algérie 2016). Depuis 2002, Algérie représentée par SONATRACH, s'est associée au projet de partenariat de la GGFR (Global Gas Flaring Reduction Initiative) visant à

aidé les gouvernements et les industries pétrolières et gazières dans leurs efforts continus à réduire le torchage et la ventilation des gaz notamment ceux associés à l'extraction des pétroles (World Bank Group, 2014).

Sur le plan du droit interne, la loi algérienne relative aux hydrocarbures interdit le torchage du gaz associé, pour lequel, il existe deux organismes régulateurs : l'Agence Nationale pour la Valorisation des Ressources en Hydrocarbures (**ALNAFT**), et l'Autorité de Régulation des Hydrocarbures (**ARH**), les deux sont créées dans le cadre de la loi des hydrocarbures de 2005.

ALNAFT est la première agence de régulation dans le secteur des hydrocarbures (O&G), est responsable des questions relatives au torchage du gaz, y compris la délivrance de permis de torchage (à titre exceptionnel) et la perception des pénalités de torchage. La taxe de torchage du gaz a été fixée de 8000 dinars/1000Nm³ en 2005 et, après des ajustements périodiques, elle a été fixée de 20 000 dinars/1000Nm³ (**BGR, 2019**).

L'ARH met en œuvre et applique les réglementations relatives aux tarifs techniques et de transport ainsi qu'au libre accès aux infrastructures pétrolières et gazières. Elle supervise également la mise en œuvre des réglementations environnementales dans le secteur des hydrocarbures, notamment :

- Désigner pour prendre en charge le contrôle et la régulation des activités relevant dans le domaine des hydrocarbures ainsi que les questions liées à la sécurité industrielle et à l'environnement.
- Inspections de sécurité pour les installations d'hydrocarbures.
- Veiller au respect de l'application de la réglementation applicable aux activités liées aux hydrocarbures, y compris celles en on-shore et off-shore et approuver les études d'impact sur l'environnement.

Pour les effets du torchage, la réglementation algérienne a mis en place deux types de taxes environnementales dans le but de minimiser les émissions de CO₂, suite au torchage :

- La taxe complémentaire sur la pollution atmosphérique (TCPA) qui a été définie par l'article 205 de la loi n°01-21 du 22 décembre 2001 portant la loi de finances pour 2002, qui concernait les quantités émises et les valeurs limites d'émission dans l'atmosphère de gaz, fumés, vapeurs, particules liquides ou solides, et

- La taxe sur le torchage qui a été définie par la loi n°05-07 relative aux hydrocarbures.

Dans ce travail, seulement la taxe sur le torchage est prise en considération.

IV.2. Revue de la littérature sur les effets des déclenchements intempestifs des SIS sur l'environnement

Plusieurs travaux de recherche sur l'impact du torchage de gaz sur la santé publique, l'environnement et l'économie ont été développés. Ces travaux ont traité plusieurs aspects de ce phénomène et peuvent être regroupés selon deux grands axes : un ensemble de travaux s'est penché sur les types, les quantités et certaines caractéristiques des émissions de gaz des torchères dans l'industrie pétrolière et gazière. D'autres se sont focalisés sur le développement de technologies alternatives permettant l'atténuation du torchage et ses effets et qui peuvent être déployées par les compagnies pétrolières et gazeuses (Emam, 2015 ; Ezaina and Saheel, 2012 ; Li and Long, 2017 ; Al-Janabiet *et al*, 2015 ; Ogwu, 2021 ; Kazemimanesh *et al*, 2021 ; Amaechi *et al*, 2021 ; Obi *et al*, 2021).

Cependant, très peu de travaux sont développés sur l'impact des activations intempestives des SIS sur l'environnement (Ghanooni, 2015).

Ezaina et Saheel (Ezaina and Saheel, 2012) proposent un travail qui traite de l'impact multiforme du torchage de gaz à l'échelle mondiale et des différentes approches employées par les chercheurs pour mesurer le gaz torché et ses émissions résultantes. Ils donnent un aperçu des méthodes employées par ces chercheurs dans l'industrie pétrolière et gazière pour tenter de déterminer les moyens de mesurer et de réduire considérablement le torchage du gaz et ses émissions. Dans leur approche, les auteurs ont procédé à des études analytiques, des études numériques, de la modélisation et des simulations informatiques. Ils ont également présenté les tendances actuelles du torchage du gaz et les développements actuels dans certains des pays les plus évasés. Le résultat indique qu'il y a apparemment une absence d'une méthode globale, d'un facteur d'émission et d'une procédure d'estimation utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière partout dans le monde pour déterminer le volume de gaz torché et ses émissions.

Dans un autre travail, Ezaina et Saheel (Ezaina and Saheel, 2015) ont utilisé le concept de bilan massique pour prédire la qualité des émissions gazeuses en se basant sur les types de combustion et les conditions prévues dans les opérations de torchage de gaz

dans l'industrie pétrolière et gazeuse. Le modèle proposé a contribué aux efforts déployés par les agences environnementales pour le suivi et la mesure de l'étendue de la pollution causée par les opérations de torchage de gaz, en réduisant le type et la quantité d'espèces chimiques dans les émissions de torchage qui peuvent dégrader notre environnement et avoir un impact négatif sur la santé humaine. Cependant, le modèle n'a pas été appliqué sur le système de torchage par les compagnies pétrolières et gazières pour garantir son efficacité.

Pour résoudre le problème de séparation huile / eau (les inconvénients du maillage simple), Li et Long (Li and Long, 2017) proposent la conception d'un dispositif à tube de séparation à deux voies en intégrant une paire de mailles avec une mouillabilité opposée. Un tel système intégré peut séparer en continu les phases huile et eau des mélanges huile/eau simultanément par une procédure en une étape avec une efficacité de séparation élevée supérieure à 99,8 % quel que soit le pétrole lourd ou le pétrole léger, même après 50 cycles d'utilisation. Ce mode de séparation fournit une nouvelle stratégie pour réaliser des applications dans le nettoyage des déversements d'hydrocarbures via un mode continu.

Dans le même contexte, (Asadi et al, 2021) proposent un nouveau procédé de récupération des gaz de torche basé sur des compresseurs à anneau liquide, dans lesquels les gaz de torche sont comprimés et traités simultanément à l'aide de méthyl diéthanolamine. Les auteurs présentent une technique d'évaluation et d'optimisation d'un système de récupération de gaz torché pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions, en utilisant l'Algorithme NSGA-II dans MATLAB lié à Aspen HYSYS. Trois fonctions objectives sont prises en compte, y compris la consommation totale d'énergie du système, la concentration du gaz H₂S récupéré et la consommation du solvant amine. Ce processus est capable de pressuriser et de traiter simultanément le gaz de torche avant injection dans le réseau de gaz combustible. Les résultats ont montré qu'en intégrant le système de récupération des gaz de torche proposé, il est possible de récupérer 87 % du pouvoir calorifique disponible dans le gaz de torche et le rejet de 28 mt d'équivalent CO₂ par jour dans l'atmosphère peut être évité. Ainsi, les aspects environnementaux de l'usine sont considérablement améliorés en empêchant le rejet de 28 mt d'équivalent CO₂ par jour dans l'atmosphère. Ainsi, un tel système de récupération des gaz de torche pourrait être considéré comme une solution prometteuse pour les industries pétrolières et gazières pour obtenir des avantages environnementaux, économiques et énergétiques.

Lakhal et tachi (Lakhal and Tachi, 2017) proposent une approche bayésienne pour la prédiction des défauts d'un transformateur de puissance électrique sur la base de la DGA (Dissolved Gas Analysis). Après avoir cartographié le triangle de Duval en réseau bayésien, ils ont pu définir et quantifier les relations causales entre les gaz dissous et les différents défauts de transformateur. En pratique, l'approche développée peut être utilisée comme méthode de soutien à la méthode DGA traditionnelle.

Pour la réduction du torchage de gaz dans l'industrie pétrolière, Alkaim et Janabi (Alkaim and Janabi, 2020) présentent un nouvel outil de prédiction basé sur le développement de la technique d'exploration de données MARS (Multivariate Adaptive regression Splines) en remplaçant le noyau par une fonction d'optimisation multi-objectifs. Le schéma d'optimisation proposé (DOM: Develop Optimization Mining) adapté au problème du torchage du gaz par rapport à d'autres techniques traditionnelles; cette étude tente de satisfaire l'équilibre entre les principaux défis de l'optimisation (le taux maximum d'extraction du pétrole, la haute précision de la conception du puits, le taux minimal de gaz brûlant et moins de coûts). Le modèle proposé conduit à une solution optimale répondant aux exigences déterminées formellement. Pour s'assurer que le DOM proposé peut gérer de telles données et résultats de preuve, les auteurs ont utilisé des mesures de vérification multiples telles que GOR (Gas-to-oil ratio), coût, etc.

Dans le but d'examiner si la réforme de la politique de torchage du gaz naturel du Dakota du Nord a procurée aux grands opérateurs un avantage concurrentiel, conduisant à une concentration accrue du marché, (Srivastavaa, 2019) a présenté une étude qui a mis en évidence certains inconvénients de cette politique et montre qu'elle est favorable aux grands opérateurs. Une étude réalisée par Gabriel E. Lade et Ivan Rudik (Lade et Rudik, 2017), montre que les politiques de réduction du torchage peuvent avoir une plus grande efficacité à moindre coût pour les opérateurs si des taxes sont imposées au lieu d'imposer un plafond sur le pourcentage de gaz qui peut être torché. Cela est dû à la capacité des opérateurs dont les puits sont à faible coût de se connecter à l'infrastructure gazière pour capter une plus grande partie de leur gaz, ce qui permet aux opérateurs ayant des coûts plus élevés de se connecter à l'infrastructure gazière pour renoncer à la capture de gaz. L'état de Dakota du Nord a vu la réduction du torchage du gaz de 36% à environ 11,2%, ce qui est une énorme réduction par rapport aux années précédentes, mais toujours au-dessus de la

moyenne nationale de 4,2% (Western Organization of Resource Council, 2017) (rapport de coupe du directeur du NDIC, 2015).

Afin de minimiser les pannes des équipements imprévues dues à des éléments défectueux pendant la phase d'exploitation qui entraînent des pertes de production, des risques pour les opérations et impactent également sur l'empreinte carbone, en raison d'un torchage indésirable, (Surange et al, 2018) ont proposé l'optimisation de vote d'architecture 'K' des capteurs de vibrations des roulements radiaux afin de réduire les arrêts intempestifs des compresseurs de gaz centrifuges, et pour répondre aux exigences de SIL, et garantir une réduction des déclenchements intempestifs et leurs conséquences. Pour cela, une configuration 2oo4 a été choisie pour les équipements rotatifs. Ils ont également encouragé les concepteurs à prendre en compte les risques liés aux aspects économiques, hygiène et sécurité et surtout environnementaux lors de la mise en œuvre de l'architecture du SIS.

L'état des lieux des travaux de recherche développés sur l'impact des défaillances des systèmes de production industriels sur l'environnement montre la non-existence de travaux adaptés à la fois à l'évaluation de l'ensemble des impacts liés aux défaillances des systèmes de sécurité, notamment les SIS et à leur déclenchements intempestifs. Ce constat fait émerger la nécessité de développer de nouvelles approches d'analyse/d'évaluation des impacts environnementaux liés notamment à la phase opérationnelle des systèmes de sécurité critiques.

Il est donc important pour la prise de décision en management d'avoir une approche systématique et approfondie des problèmes critiques où un bon équilibre entre les contraintes de sécurité, environnementales et économiques est nécessaire [NORSOK Standard, 1998].

Pour cette raison, et dans le cadre de notre travail, les risques environnementaux des défaillances des systèmes de sécurité devraient être pris en considération lors de la prise de décision sur le choix de la stratégie de maintenance la mieux adaptée à la section soufflante, en particulier son SIS.

Dans ce contexte, une approche d'analyse et d'évaluation quantitative des fréquences de torchage causées par des arrêts intempestifs d'un ESD d'une section soufflante et l'optimisation des stratégies de maintenance afin de minimiser les effets environnementaux liés au torchage de gaz est proposé. En effet, les exigences

environnementales peuvent avoir des implications sur la conception, les stratégies d'exploitation et de maintenance relatives à ce type de système, celles-ci peuvent affecter la régularité, les interfaces et les interactions doivent être ciblées.

Cette approche consiste d'une part, à identifier les scénarios d'occurrence de torchage à l'aide de la méthode HAZOP et estimer leurs fréquences d'occurrence dans le cas d'une demande réelle et dans le cas d'un arrêt intempestif à l'aide de la méthode AdE durant la phase opérationnelle du SIS. La détermination des causes des déclenchements intempestifs des SIS conduisant au torchages à l'aide de la méthode AdD. D'autre part, l'optimisation multi-objective des performances de SIS à l'aide des algorithmes génétique est réalisée afin de minimiser l'occurrence de cet événement critique.

IV.3. Analyse des risques environnementaux causés par les activations des SIS

Afin d'évaluer quantitativement l'impact des activations d'ESD sur l'environnement en utilisant des outils d'analyse des risques, une approche d'évaluation et d'optimisation des fréquences de torchage causées par les arrêts intempestifs de l'ESD de la section soufflante (étudiée précédemment dans le chapitre III) est présentée dans cette partie de notre travail. Cette approche consiste d'une part, à identifier les scénarios d'occurrence de torchage à l'aide de la méthode HAZOP et d'estimer leurs fréquences d'occurrence dans le cas d'une demande réelle à l'aide de la méthode AdE et dans le cas d'un arrêt intempestif, la détermination de la fréquence ainsi que les causes de ce scénario est faite moyennant la méthode AdD.

IV.3.1 Identification des scénarios conduisant au torchage de gaz

L'identification des scénarios conduisant au torchage de gaz en cas d'arrêts d'urgence de l'ESD, est faite via la méthode HAZOP durant la phase opérationnelle de la section soufflante. Les résultats de cette application sont donnés dans le tableau (IV.1).

Scénario	Causes possibles	Conséquence	Protection
Défaillance de la boucle de régulation Température-Pression	<ul style="list-style-type: none"> -Fermeture de la vanne 11-XV-001. -Fermeture des vannes :(11-XV-002 ou 11-PV-009) et 11-PV-008 -Fermeture de la vanne manuelle d'entrée 28. -Moins/Plus de débit à l'arrivée des (C7, C8, C9 et C10) 	<ul style="list-style-type: none"> -Abaissement /Elévation de pression du 11-K-001F -Possibilité de destruction de compresseur et l'incendie. -Elévation de température à la sortie de 11-E-001. -Impact - environnemental important causé par le torchage au niveau des centres de séparation 	<ul style="list-style-type: none"> -11-PICA-003 : (0.07 ≤ alarme ≤ 0.3 bar). - Ouverture de 11-FV-001. -11-TICA-004 : alarme (≥ 75°C) . -11-PAHH-007 : alarme (≥ 3.5 bar) ou alarmes (11-VAHH-301,11-ZAHH-301, 11-TAHH-301, 11-TAHH-302) suite un déclenchement de l'ESD et une alarme 11-UZA-001 (arrêt soufflante : 11-K-001). -11-TAHH-003 : alarme (≥ 150°C) ou alarme (11-PAHH-007) suite un déclenchement de l'ESD et une alarme 11-UZA-001 (arrêt soufflante : 11-K-001) -Déclenchement des Soupapes de sécurité.
Défaillance de la boucle de régulation Niveau de liquide	<ul style="list-style-type: none"> -Mauvaise séparation de brute au niveau des (C7, C8, C9 et C10). -Mauvais fonctionnement de la vanne 11-LV-001 -Fermeture de la vanne : 11-LV-001. -Fermeture de la vanne : 11-LV-001 	<ul style="list-style-type: none"> -Possibilité de destruction de compresseur Basé sur la méthode objective -Impact - environnemental important causé par le torchage au niveau des centres de séparation 	<ul style="list-style-type: none"> -11-LICA-001 : alarme (25% ≤ niveau ≤ 35% / volume de ballon 11-B-001). -Opérateur ouvre la vanne manuelle rapidement. -11-LAHH-003: alarme (≥ 35% / volume de ballon 11-B-001) ou alarmes (11-VAHH-301, 11-ZAHH-301) suite un déclenchement de l'ESD et une alarme 11-UZA-001 (arrêt soufflante : 11-K-001).

Tableau IV.1 : Identification des scénarios conduisant au torchage de gaz par HAZOP

Plusieurs scénarios ont été établis, le choix s'est porté sur deux scénarios donnant comme conséquence, l'arrêt de la section soufflante et torchage de toute la quantité de gaz (tableau IV.1). Ces scénarios sont causés par les événements initiateurs suivants :

- Défaillance de la boucle de régulation Température – Pression ;
- Défaillance de la boucle de régulation Niveau ;

Pour faire face à cette conséquence, les barrières de sécurité mises en place sont :

- L'alarme & opérateur
- Système d'arrêt d'urgence ESD
- Soupape de sécurité.

Afin d'estimer la fréquence de torchage, deux cas seront analysés, dans un premier cas le torchage est causé par l'activation réelle de l'ESD et dans le deuxième cas il est causé par une activation intempestive de ce dernier, l'objet de la sous-section suivante.

IV.3.2. Estimation de la fréquence de torchage causée par une activation réelle de l'ESD

La méthode Arbre des Evénements (AdE) est utilisée pour modéliser et estimer la fréquence de torchage dans le cas d'un déclenchement réel de l'ESD de la section soufflante, pour les deux scénarios retenus.

Les données utilisées pour estimer la fréquence de ces deux scénarios sont mentionnées dans le tableau (IV.2).

Barrière	Probabilité de défaillance
<u>Alarme</u>	1E-3
<u>Opérateur Humain</u>	1E-2
<u>PSV</u>	1E-2
<u>ESD</u>	0.0170
L'événement initiateur (<i>surpression causée par la défaillance de la boucle de régulation Pression-Température</i>)= 0.1/an	
L'événement initiateur (<i>suppression causé par la défaillance de la boucle de régulation de niveau</i>) = 0.1/ an	

Tableau IV.2 : PFD et fréquence des barrières de sécurité existantes [ICSI, 2009]

a. Premier scénario « Torchage causé par la défaillance de la boucle de régulation Température – Pression »

La figure (IV.1) montre l'arbre d'évènements relatifs au premier scénario d'accident retenu pour cette étude.

Le torchage dans ce scénario est causé par la séquence (03) et la séquence (06), ainsi la fréquence de torchage totale est donnée par l'équation suivante :

- $Fr(\text{Torchage}) = Fr(\text{séquence 03}) + Fr(\text{séquence 06})$

Après l'application numérique, nous avons trouvé une fréquence de torchage égale 1,2369 E-9/h soit 1,0835 E-5/an.

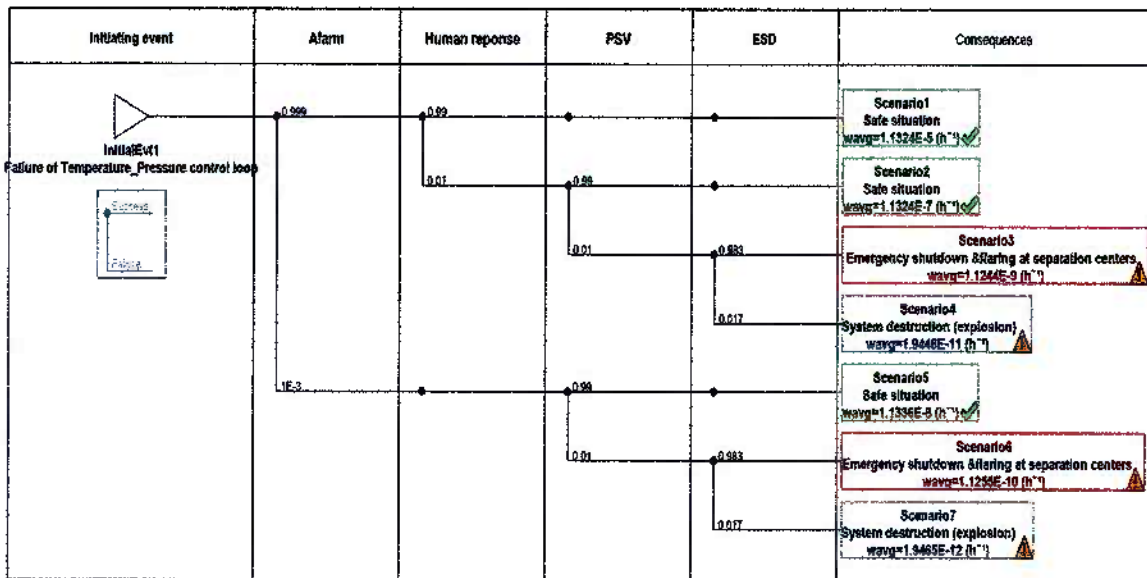


Figure IV.1 : AdE relatif au premier scénario

b. Deuxième scénario « Torchage causé par la défaillance de la boucle de régulation Niveau du liquide »

La figure (IV.2) montre l'arbre d'évènements relatifs au deuxième scénario d'accident retenu pour cette étude.

Le torchage dans ce scénario est causé par la séquence (02) et la séquence (04), ainsi la fréquence de torchage totale est donnée par l'équation suivante :

- $Fr(\text{Torchage}) = Fr(\text{séquence 02}) + Fr(\text{séquence 04})$

Après l'application numérique, nous avons trouvé une fréquence de torchage égale

1,2369 E-7/h soit 1,0835 E-3/an.

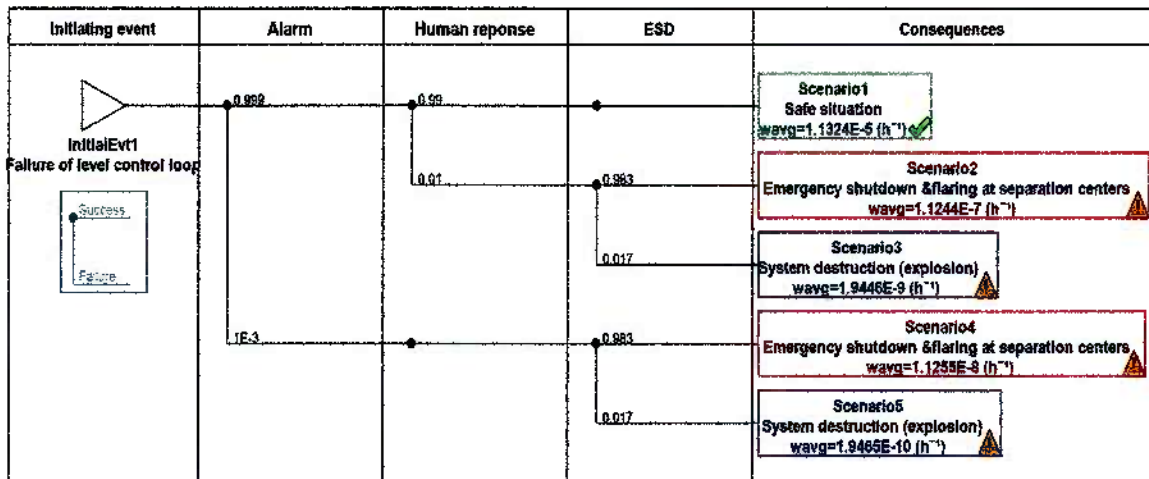


Figure IV.2 : AdE relatif au deuxième scénario

Par conséquent la fréquence total = 1, 0943E-03/ an

IV.3.3. Estimation de la fréquence de torchage causé par une activation intempestive de l'ESD

Afin d'estimer la fréquence de torchage causée par l'arrêt intempestif de la section soufflante, la modélisation à l'aide de la méthode Arbre de Défaillances (AdD) permet de déterminer les causes réelles (directes et indirectes) des déclenchements intempestifs et estimer par la suite la fréquence de torchage. Plusieurs travaux ont montré la pertinence de la méthode AdD dans l'estimation par rapport aux formules analytiques développées dans la littérature (Touahar, 2015 ; Confer 2019).

Le déclenchement intempestif du système ESD de la section soufflante est considéré comme un événement sommet ou indésirable de l'AdD (Fig.IV.3). Notons que les défaillances de causes communes sont prises en considérations lors de la modélisation. L'élaboration et le traitement de l'AdD sont faits par le logiciel GRIF.

L'expression booléenne de l'événement indésirable est obtenue sous la forme :

$$S = C_1 + C_2 + \dots + C_N = \sum_{i=1}^n C_i \dots \dots \dots (IV.1)$$

Selon la troisième partie du rapport technique ISA-TR 84.00.02-2002 part 03, l'estimation du taux de déclenchement intempestif est différente de celle de la probabilité de défaillance à la demande PFD alors que le STR est une fréquence. Pour la porte 'OU' le STR de deux événements de base est la somme des STR relatifs à chaque composant, et pour la porte 'ET', le STR est calculé mathématiquement pour deux événements de base comme suit :

$$STR = \text{Probabilité de défaillance du composant 1} \times \text{Fréquence de défaillance (STR) du composant 2} + \text{Probabilité de défaillance de composant 2} \times \text{Fréquence de défaillance (STR) de composant 1. (IV.2)}$$

Le traitement qualitatif de l'AdD construit (Figure IV.3) montre l'existence de **31** coupes minimales :

- **18 coupes d'ordre 01**
- **13 coupes d'ordre 02**

Après l'application numérique à l'aide du logiciel GRIF, la valeur de STR estimée pour une période de test de 8760 heure est égale à **4.257E-5 /Heure** comme montré sur le tableau (IV.3).

Sous systèmes		STR (par heure)	
Capteurs (S)	Capteurs de Niveau	3.2E-6	
	Capteurs de Pression	2.6E-6	
	Capteurs de Température	11-TE-302 (1003)	3.64E-6
		11-TE-303 (1003)	3.64E-6
		11-TE (2002)	1.3836E-7
		11-TT-003 (1001)	1.3E-6
	Total	1.024E-5	
Total	1.604E-5		
L'unité Logique (LS)		2.6224E-5	
Les éléments Finaux (FE)		3.0578E-7	
STR ^{ESD} /Fréquence de Torchage		4.257E-5	
STR = 4.257E-5 /h * 8760 h *15 years = 5.59 ≈ 6 times per SIS life cycle			

Tableau IV.3 : STR des différents sous systèmes d'ESD

Une première interprétation de ces résultats montre que l'occurrence de l'arrêt intempestif (**Spurious Shut Down**) est causée notamment par le déclenchement

intempestif (**Spurious Trip**) de l'unité logique ou des capteurs, en particulier l'opération intempestive (**Spurious Operation**) des capteurs de température. Le nombre de coupes minimales montre la fragilité de l'ESD étudié, ce qui conduit à une fréquence élevée d'occurrence de l'événement indésirable à savoir le torchage.

La valeur du STR pour le sous-système « éléments finaux (FE) » est relativement faible par rapport aux valeurs correspondants aux deux autres sous-systèmes. Par conséquent, on peut simplifier l'équation de STR, elle devient :

$$STR_{ESD} \approx STR_{Si} + STR_L \quad (IV.3)$$

Ce résultat confirme notre choix concernant le changement de voting des Sensors et de l'unité logique dans le chapitre précédent.

Par ailleurs, en comparant les fréquences de torchage estimées (§ 4.2, 4.3) dans les deux cas d'activation (réelle ou intempestive) de l'ESD, les quantités de gaz torché sont très importantes dans les deux cas d'activation en les comparant au seuil réglementaire (1Nm³/h) (décret 25 Aout, 2021). Il est donc impératif d'optimiser les stratégies de maintenance afin de réduire la fréquence de torchage.

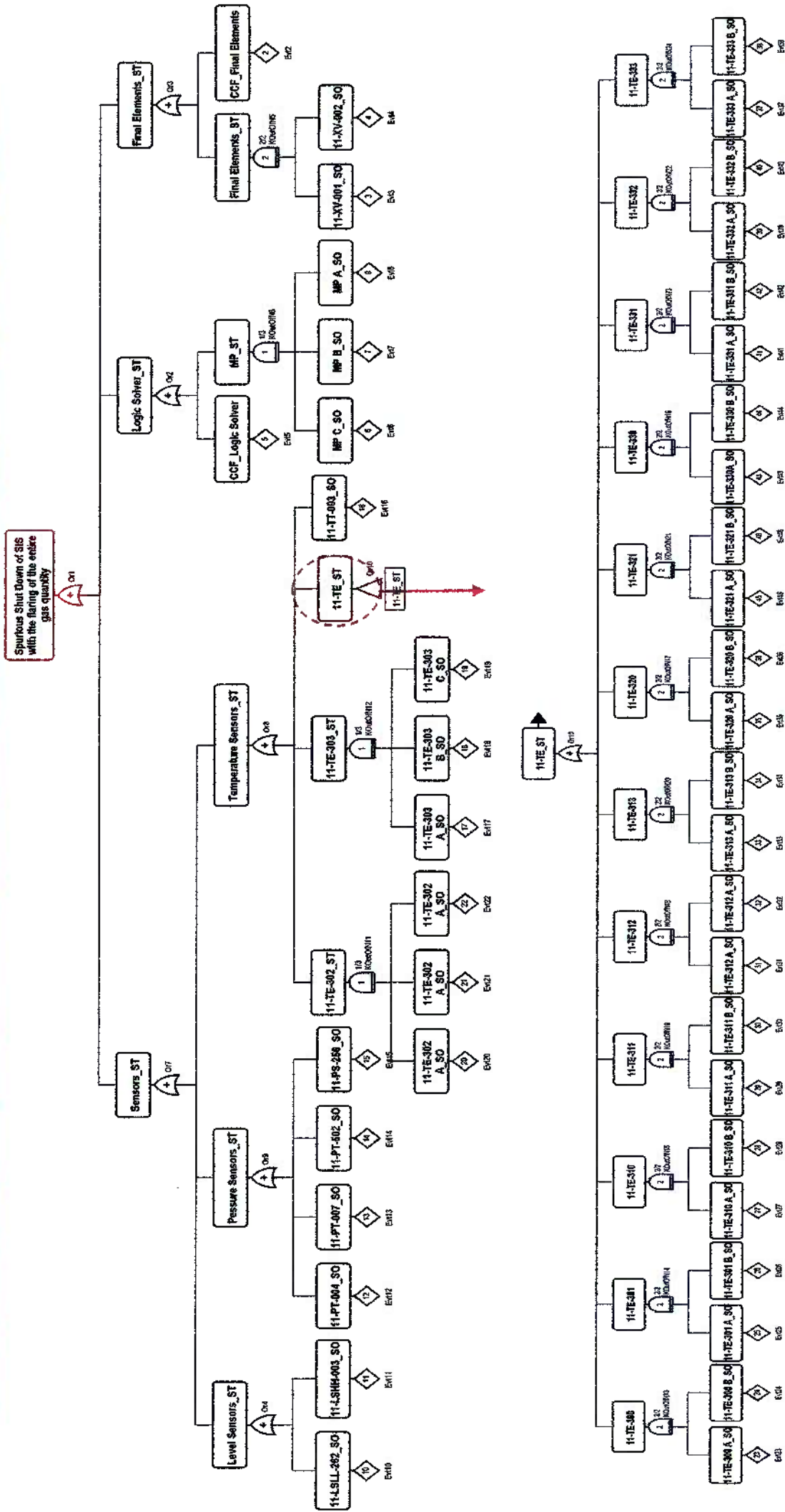


Figure IV.3: Modélisation des causes d'arrêt intempestif d'ESD/de Torchage par l'AdD (GRIF, 2021).

IV.4. Apport de l'optimisation multi-objectifs des stratégies de maintenance des SIS dans la réduction de torchage

L'optimisation des stratégies de maintenance est nécessaire pour la réduction des fréquences de torchage ainsi que les indicateurs des performances de l'ESD étudié (PFDavg, STR et LCC) en prenant en considération les contraintes de coût de maintenance préventive (coût des tests périodiques) et coût de maintenance corrective.

La résolution de notre problème à l'aide des AG consiste à développer les différentes étapes précédemment détaillé dans le chapitre **III** sur deux stratégies de maintenance :

- **Première stratégie** : Il s'agit dans cette première stratégie d'implémenter une politique de test (T) sans changement de vote d'architecture 'K'.
- **Deuxième stratégie** : Il s'agit d'implémenter une politique de test (T) avec changement de deux paramètres: la période de test (T) et le vote d'architecture 'K'. On note que le changement de configuration n'affecte que les capteurs de température de refoulement en aval de la soufflante 11-K-001, et de bobinage du moteur 11-KM-001 ayant une architecture 1003. Un tel choix est justifié par le fait que ces capteurs sont en redondance et détectent le même point pour chaque équipement. Par ailleurs, le retour d'expérience montre que ces capteurs sont parmi les causes des arrêts intempestives.

La première stratégie consiste à optimiser les performances des SIS on prend en considération les taxes de torchage dans la modélisation des coûts de cycle de vie des SIS sans changement de voting des capteurs de température et de l'unité logique sous les contraintes C_T^{MAX} et C_{CM}^{MAX}

La deuxième stratégie consiste à optimiser les performances des SIS on prend en considération le nouveau modèle de coût de cycle de vie avec changement de voting des capteurs de températures et de l'unité logique sous les contraintes de C_T^{MAX} et C_{CM}^{MAX}

Variables de décisions			Fonctions objectifs					
T1 _(Sensors)	T1 _(LS)	T1 _(SDV)	PFD_{moy}^{ESD}	STR_{moy}^{ESD}	$LCC_{T\&CM}$	FV $LCC_{T\&CM}$	Quantité de gas torchée par les activations intempêtes (Nm ³)	Les taxes de Torchage (\$)
A. Sans Contraintes								
1	1	1	0,00855	4,2511E-05	1,4787E+05	3,1908E+06	3,4130E+06	4,9488E+05
2	1	1	0,00855	4,2561E-05	1,4469E+05	3,1221E+06	3,4170E+06	4,9547E+05
1	2	1	0,00863	4,2511E-05	1,4722E+05	3,1768E+06	3,4130E+06	4,9488E+05
2	3	2	0,01715	4,2587E-05	1,4368E+05	3,1005E+06	3,4191E+06	4,9577E+05
3	2	1	0,00863	4,2611E-05	1,4308E+05	3,0874E+06	3,4211E+06	4,9605E+05
2	2	1	0,00863	4,2561E-05	1,4404E+05	3,1081E+06	3,4170E+06	4,9547E+05
1	3	2	0,01715	4,2536E-05	1,4686E+05	3,1691E+06	3,4151E+06	4,9518E+05
3	3	2	0,01715	4,2637E-05	1,4272E+05	3,0797E+06	3,4231E+06	4,9636E+05
3	3	1	0,00872	4,2611E-05	1,4286E+05	3,0827E+06	3,4211E+06	4,9605E+05
1	3	1	0,00872	4,2511E-05	1,4700E+05	3,1721E+06	3,4130E+06	4,9488E+05
2	3	1	0,00872	4,2561E-05	1,4382E+05	3,1035E+06	3,4170E+06	4,9547E+05
3	1	1	0,00855	4,2611E-05	1,4372E+05	3,1014E+06	3,4211E+06	4,9605E+05
B. Sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$								
2	1	1	0,008546	4,2561E-05	1,4469E+05	3,1221E+06	3,4170E+06	4,9547E+05
3	3	1	0,008723	4,2611E-05	1,4286E+05	3,0827E+06	3,4211E+06	4,9605E+05
3	2	1	0,008629	4,2611E-05	1,4308E+05	3,0874E+06	3,4211E+06	4,9605E+05
2	3	2	0,017149	4,2587E-05	1,4368E+05	3,1005E+06	3,4191E+06	4,9577E+05
1	3	2	0,017149	4,2536E-05	1,4686E+05	3,1691E+06	3,4151E+06	4,9518E+05
2	2	1	0,008629	4,2561E-05	1,4404E+05	3,1081E+06	3,4170E+06	4,9547E+05
3	3	2	0,017149	4,2637E-05	1,4272E+05	3,0797E+06	3,4231E+06	4,9636E+05
1	2	1	0,008629	4,2511E-05	1,4722E+05	3,1768E+06	3,4130E+06	4,9488E+05
1	3	1	0,008723	4,2511E-05	1,4700E+05	3,1721E+06	3,4130E+06	4,9488E+05
2	3	1	0,008723	4,2561E-05	1,4382E+05	3,1035E+06	3,4170E+06	4,9547E+05
3	1	1	0,00855	4,2611E-05	1,4372E+05	3,1014E+06	3,4211E+06	4,9605E+05

Tableau IV.4 : L'optimisation multi-objectifs de STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et $LCC_{T\&CM}$ et la Quantité de Gaz Torchée (Stratégie 01).

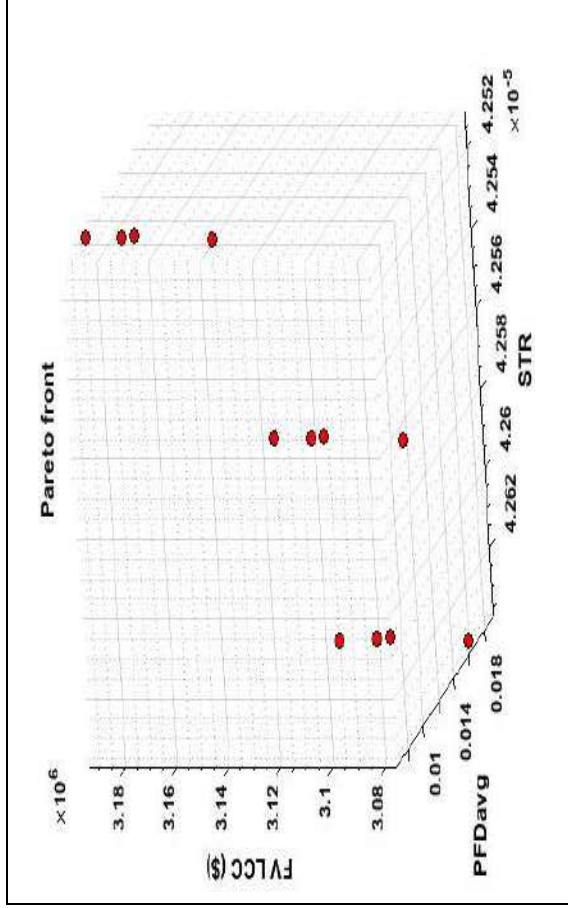


Figure IV.4 : Le Front de Pareto de la première stratégie sans contraintes

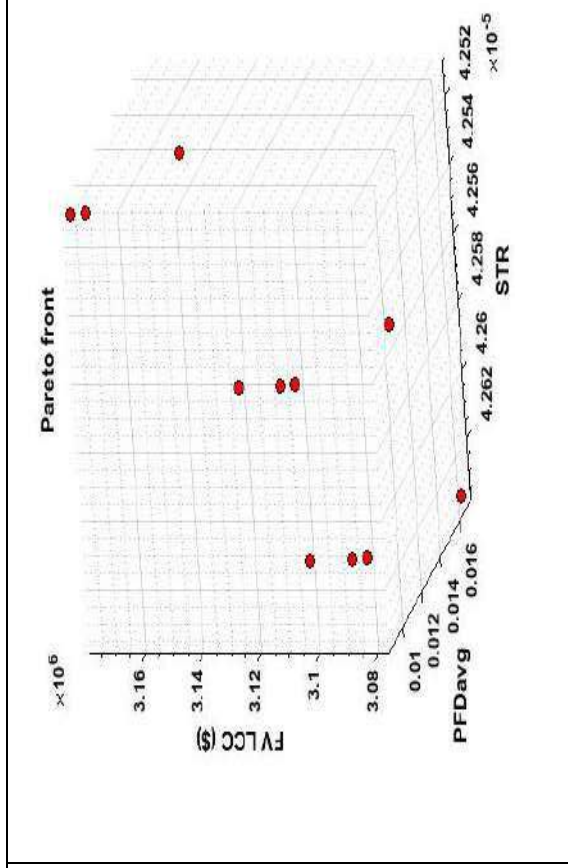
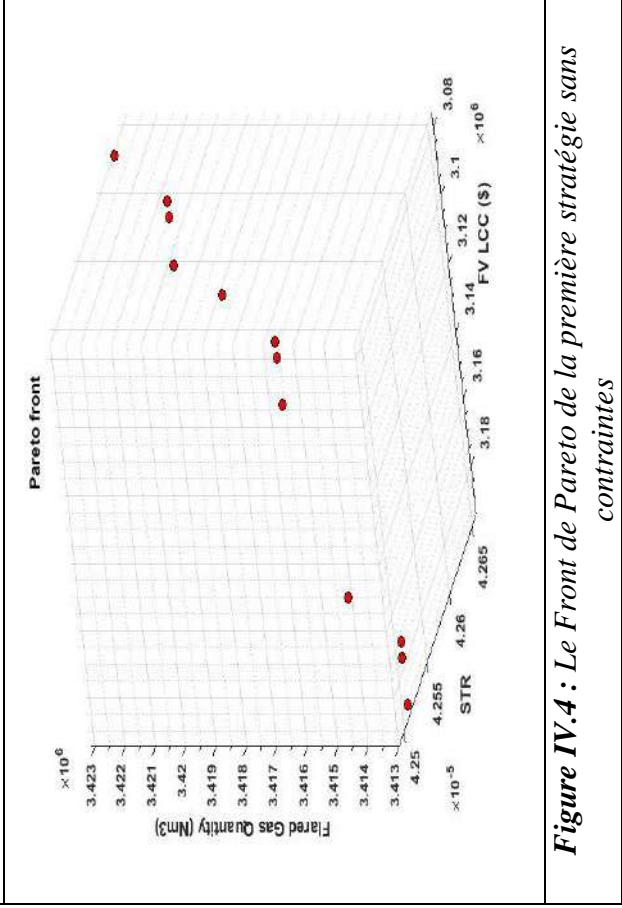


Figure IV.5 : Le Front de Pareto de la première stratégie sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$



Variables de décisions					Fonctions objectifs					
$T1_{(Sensors)}$	$T1_{(LS)}$	$T1_{(SDV)}$	$K1_{(sensors)}$	$K2_{(LS)}$	PFD_{moy}^{ESD}	STR_{moy}^{ESD}	$LCC_{T\&CM}$	$FV_{LCC_{T\&CM}}$	Quantité de gas torchée par les activations intempestives (Nm ³)	Les taxes de Torchage (\$)
A. Sans Contraintes										
1	2	1	2	1	0,008629	3,552E-05	1,266E+05	2,733E+06	2,851E+06	4,135E+05
3	1	1	2	1	0,008546	3,567E-05	1,233E+05	2,660E+06	2,864E+06	4,152E+05
3	3	1	2	1	0,008723	3,567E-05	1,224E+05	2,642E+06	2,864E+06	4,152E+05
2	1	2	2	2	0,017209	1,028E-05	4,948E+04	1,068E+06	8,256E+05	1,197E+05
1	1	1	2	2	0,008783	1,018E-05	5,273E+04	1,138E+06	8,174E+05	1,185E+05
1	3	1	2	1	0,008723	3,552E-05	1,264E+05	2,728E+06	2,851E+06	4,135E+05
1	1	2	2	2	0,017209	1,021E-05	5,259E+04	1,135E+06	8,195E+05	1,188E+05
3	1	2	2	2	0,017209	1,036E-05	4,859E+04	1,049E+06	8,316E+05	1,206E+05
2	1	1	2	2	0,008783	1,026E-05	4,962E+04	1,071E+06	8,235E+05	1,194E+05
3	2	1	2	1	0,008629	3,567E-05	1,226E+05	2,646E+06	2,864E+06	4,152E+05
2	2	1	2	1	0,008629	3,559E-05	1,235E+05	2,666E+06	2,857E+06	4,143E+05
2	1	1	2	1	0,008546	3,559E-05	1,242E+05	2,680E+06	2,857E+06	4,143E+05
1	1	1	2	1	0,008546	3,552E-05	1,273E+05	2,747E+06	2,851E+06	4,135E+05
3	1	1	2	2	0,008783	1,033E-05	4,873E+04	1,052E+06	8,295E+05	1,203E+05
2	3	1	2	1	0,008723	3,559E-05	1,2331E+05	2,6609E+06	2,8575E+06	4,1433E+05
B. Sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$										
1	2	1	2	1	0,008629	3,552E-05	1,266E+05	2,733E+06	2,851E+06	4,135E+05
3	1	1	2	1	0,008546	3,567E-05	1,233E+05	2,660E+06	2,864E+06	4,152E+05
3	3	1	2	1	0,008723	3,567E-05	1,224E+05	2,642E+06	2,864E+06	4,152E+05
2	1	2	2	2	0,017209	1,028E-05	4,948E+04	1,068E+06	8,256E+05	1,197E+05
1	3	1	2	1	0,008723	3,552E-05	1,264E+05	2,728E+06	2,851E+06	4,135E+05
1	1	2	2	2	0,017209	1,021E-05	5,259E+04	1,135E+06	8,195E+05	1,188E+05
3	1	2	2	2	0,017209	1,036E-05	4,859E+04	1,049E+06	8,316E+05	1,206E+05
3	1	1	2	2	0,008783	1,033E-05	4,873E+04	1,052E+06	8,295E+05	1,203E+05
2	2	1	2	1	0,008629	3,559E-05	1,235E+05	2,666E+06	2,857E+06	4,143E+05
2	1	1	2	1	0,008546	3,559E-05	1,242E+05	2,680E+06	2,857E+06	4,143E+05
2	1	1	2	2	0,008783	1,026E-05	4,962E+04	1,071E+06	8,235E+05	1,194E+05
3	2	1	2	1	0,008629	3,567E-05	1,226E+05	2,646E+06	2,864E+06	4,152E+05
2	3	1	2	1	0,008723	3,559E-05	1,2331E+05	2,6609E+06	2,8575E+06	4,1433E+05

Tableau IV.5 : L'optimisation multi-objectifs de STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} et la Quantité de Gaz Torchée (Stratégie 02).

<p>Figure IV.6: Le Front de Pareto de la deuxième stratégie sans contraintes</p>	<p>Figure IV.7: Le Front de Pareto de la deuxième stratégie sous les contraintes de $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ et $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$</p>

Discussion :

D'après les résultats obtenus, la solution [2 1 1] est la plus adéquate pour la première stratégie qui correspond à un intervalle de test de 4380 heures pour les sous-systèmes, l'unité logique et les éléments finaux et de 8760 heures pour les capteurs. D'autre part, la quantité de Gaz torchée $3.417 \text{ E}+6 \text{ Nm}^3$ qui correspond à une taxe de $3.417\text{E}+5$ dollars durant le cycle de vie de l'ESD.

Pour la deuxième stratégie, la solution [2 1 1 2 2] est la plus adéquate, elle montre que le changement de voting des capteurs de température et de l'unité logique de 1003 à 2003, en respectant l'intervalle de test précédent, assure une réduction considérable des pertes économiques et des impacts environnementaux (torchage). D'autre part, la quantité de Gaz torchée $8,235\text{E}+05 \text{ Nm}^3$ qui correspond à une taxe de $8,235\text{E}+04$ dollars durant le cycle de vie de l'ESD.

Pour cette raison, nous encourageons l'adoption de la deuxième stratégie puisque la quantité de Gaz torchée dans la première stratégie est quatre (4) fois supérieure à celle de la deuxième stratégie.

Une comparaison des résultats obtenus (tableau IV.5) de la simulation précédente (chapitre III), nous remarquons l'élimination de certaines solutions trouvées comme optimales :

Pour la première stratégie :

Sans contrainte : [3 3 3].

Pour la deuxième stratégie :

Sans contrainte et avec contrainte : [3 1 3 2 2] ; [2 1 3 2 2] ; [1 1 3 2 2].

La prise de décision sur la stratégie de maintenance la plus optimale, qui prend en considération les taxes de torchage dans l'expression de LCC, renforce notre choix.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé dans un premier temps, une approche d'analyse de risques afin d'estimer la fréquence de torchage dans le cas des activations de l'ESD réelle et intempestive de la section soufflante, en utilisant des outils d'analyse de risques.

Dans la deuxième partie, une optimisation des stratégies de maintenance par les algorithmes génétiques afin de sélectionner la stratégie optimale en prenant en considération en plus des contraintes prises dans le modèle précédent (Chapitre III), les taxes de torchage et la quantité de gaz torchée.

Les résultats obtenus montrent que certaines solutions trouvées comme optimales ont été éliminées.

D'autre part, l'approche proposée vise à montrer l'apport de l'optimisation des stratégies de maintenance proposée dans la réduction des pertes économiques et des impacts environnementaux (torchage) causé par les déclenchements intempestifs. Cette approche nous permettra de consolider les décisions des décideurs et de développer des stratégies de maintenance qui permettent de minimiser le RTR & STR à des valeurs adéquates acceptables et la réduction de la quantité de gaz torché en contribuant ainsi à la protection de l'environnement par la maîtrise des risques d'émission de gaz torchés en cas d'arrêt causé par des RT & ST.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Nous présentons dans cette conclusion générale l'essentiel des travaux réalisés, les difficultés rencontrées ainsi que les perspectives à envisager.

Rappelons que l'objectif de ce travail entre dans le cadre de l'amélioration de la sécurité, la disponibilité du système de production et la qualité de l'environnement, des installations industrielles dans le secteur énergétique. Pour ce faire, deux modèles d'optimisation multi-objective des performances des SIS en phase opérationnelle par les algorithmes génétiques sont proposés afin d'établir un compromis entre ses indicateurs de performance.

- Le premier modèle a pour objectif la minimisation de la $PF D_{moy}^{ESD}$, STR_{moy}^{ESD} et $LCCT_{\&CM}$ sous la contrainte des coûts de maintenance. Pour cela, nous avons développés et évalués deux stratégies de maintenance en implémentant une politique de test (T) sans et avec changement de vote d'architecture K des capteurs et de l'unité logique.

Les résultats obtenus (chapitre III) montrent que la politique des tests et le voting des architectures des sous-systèmes des capteurs et de l'unité logique du SIS ont un effet important sur l'optimisation des indicateurs de performance du SIS étudié.

Par ailleurs, après avoir fait une étude comparative des solutions obtenues, nous recommandons l'utilisation de la stratégie suivante :

- Effectuer des tests des sensors chaque 18 mois ;
 - Effectuer des tests de Logic Solver et de Final Element chaque 06 mois ;
 - Changer l'architecture de Sensors et de Logic Solver de 1003 à 2003.
-
- Le deuxième modèle a pour objectif, dans un premier temps de proposer une analyse de risques afin d'estimer la fréquence de torchage dans le cas des activations de l'ESD réelle et intempestive de la section soufflante, en utilisant des outils d'analyse de risques. Dans la deuxième partie, une optimisation des stratégies de maintenance par les algorithmes génétiques afin de sélectionner la stratégie optimale en prenant en considération en plus des contraintes prises dans le modèle précédent (Chapitre III), les taxes de torchage et la quantité de gaz torchée. Les résultats obtenus montrent que

certaines solutions trouvées comme optimales dans le modèle précédent ont été éliminées. La solution retenue représente l'optimum des solutions optimales.

D'autre part, l'approche proposée vise à montrer l'apport de l'optimisation des stratégies de maintenance proposée dans la réduction des pertes économiques (perte de production, coûts de maintenance et taxes de torchage de gaz) et des impacts environnementaux (torchage) causé par les déclenchements intempestifs.

Les approches proposées présentent plusieurs avantages :

- Elles montrent que les stratégies de maintenance des SIS définies par le concepteur de la section soufflante peut être modifiée et améliorée durant la phase opérationnelle. Dans le cas par exemple des déclenchements intempestifs des SIS n'ont pas été connus ni pris en considération par les industriels avant 2008 (Rausand, 2008 ; Torres, 2009) ;
- Elles constituent des stratégies d'investissement les moins coûteuses pour l'amélioration des performances du SIS. Elles ont permises une minimisation considérable des coûts du cycle de vie du SIS ;
- Elles constituent un outil d'aide à la prise de décision pour l'équipe de management de l'entreprise SONATRACH et contribuent dans le management de l'amélioration continue des performances des installations pétrolières dotées d'ESD ;
- Elles permettront de consolider les décisions des managers et de développer des stratégies de maintenance qui permettent de minimiser le RTR & STR à des valeurs adéquates acceptables et la réduction de la quantité de gaz torché en contribuant ainsi à la protection de l'environnement par la maîtrise des risques d'émission de gaz torchés en cas d'arrêt causé par des RT & ST

Comme première perspective pour ce travail, la généralisation d'application des modèles développés dans d'autres secteurs industriels Algériens afin d'arriver à un compromis dans la balance sécurité-disponibilité-développement durable.

Par ailleurs, inviter les législateurs algériens à exiger aux industriels la mise en conformité des installations industrielles qui présentent des risques majeurs par la mise en place des stratégies de maintenance qui prennent en considération les déclenchements intempestifs et par conséquent les effets de ces derniers.

ANNEXES

Exemple d'un dossier de données "Final Elements" de la référence PDS Data Handbook, 2006 Edition.

Module : Input devices		PDS Reliability Data Dossier
Component : Pressure Transmitter, Conventional		
Description The pressure transmitter includes the sensing element, local electronics and the process isolation valves.	Date of Revision 2006-01-27	
	Remarks	
Recommended Values for Calculation		
<i>Total rate</i>	<i>Coverage</i>	<i>Undetected rate</i>
$\lambda_D = 0.8 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$	$C_D = 0.60$	$\lambda_{DU} = 0.3 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$
$\lambda_{ST} = 0.5 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$	$C_{ST} = 0.50$	$\lambda_{STU} = 0.3 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$
$\lambda_{Crit} = 1.3 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$	$P_{TIF} = 5 \cdot 10^{-4}$	
	$r = 0.3$	
<p>Assessment The failure rate estimate is mainly based on data from OREDA phase III. An insufficient amount of data has been found in OREDA phase IV in order to update this estimate (no data from phase V). The rate of DU failures is estimated assuming a coverage of 60 % (as compared to 90 % in the 2003 handbook). If a higher coverage is claimed, special documentation/verification should be required. The rate of ST failures is estimated assuming a coverage of 50 % (expert judgment).</p> <p>The P_{TIF} is entirely based on expert judgments. The estimated r is based on reported failure causes in OREDA as well as expert judgments. A summary of some of the main arguments is provided in section 2.4.</p>		
Failure Rate References		
Overall failure rate (per 10^6 hrs)	Failure mode distribution	Data source/comment
$\lambda_{Crit} = 1.3$	$\lambda_D = 0.8 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$ $\lambda_{DU} = 0.3 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$ $\lambda_{STU} = 0.4 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$ $P_{TIF} = 3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4} 1)$	Recommended values for calculation in 2004-edition. Assumed $C_D = 60\%$ 1) For smart/conventional respectively
$\lambda_{Crit} = 1.3$	$\lambda_{DU} = 0.1 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$ $\lambda_{STU} = 0.4 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$ $P_{TIF} = 3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4} 1)$	Recommended values for calculation in 2003-edition. Assumed $C_D = 90\%$ 1) For smart/conventional respectively

Module : Input devices		PDS Reliability Data Dossier
Component : Pressure Transmitter, Conventional		
N/A	D: N/A ST: N/A <i>Observed</i> $C_D = N/A$ $C_{ST} = N/A$	OREDA phase IV database Data relevant for conventional pressure transmitters. <i>Filter:</i> Inv. Equipment class = pressure Sensors AND Inv. Design class = pressure AND Inv. Att. Type process sensor = transmitter AND Inv. Phase = 4 AND (Inv. System = Gas processing OR Oil processing OR Condensate processing) AND Inv. Phase = 4 No. of inventories =21 No. of critical (D or STT) failure =0 Surveillance Time (hours) = 332 784
$\lambda_{\text{Crit}} = 1.5$	D: 0.64 ST: 0.64 <i>Observed</i> $C_D = 100\%$ (calculated for transmitters having some kind of self-test arrangement only)	OREDA phase III database, Data relevant for conventional pressure transmitter. Failure criteria: TAXCOD ='PSPR'. AND. FUNCIN='OP' .OR 'GP' No. of inventories = 186 Total no. of failure = 89 Cal. Time= 4 680 1820 hrs <i>Note! Only failure classified as "critical" are included in the failure rate estimates.</i>
	$\lambda_{\text{DU}} = 0.6$ per 10^6 hrs ¹⁾ $\lambda_{\text{DU}} = 26$ per 10^6 hrs ²⁾ SFF = 60 % ¹⁾	Exida: Generic DP/pressure transmitter ¹⁾ In clean service ²⁾ Impulse line plugging likely
	Fail to obtain signal: 0.83	T-Book: pressure transmitter
	Fail to obtain signal: 0.91	T-Book: pressure difference transmitter/ pressure difference cell

Module : Final Elements		PDS Reliability Data Dossier
Component : ESV/XV		
Description Main valves including actuator. Valve de-energized to close. <i>Not</i> including pilot valve	Date of Revision 2006-01-27	
		Remarks ESV/XV incl. actuator (ex.pilot)
Recommended Values for Calculation		
Total rate	Coverage	Undetected rate
$\lambda_D = 2.7 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$	$C_D = 0.25$	$\lambda_{DU} = 2.0 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$
$\lambda_{ST} = 2.7 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$	$C_{ST} = 0$	$\lambda_{STU} = 2.7 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$
$\lambda_{Crit} = 5.4 \text{ per } 10^6 \text{ hrs}$	$P_{TIF} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ (extended functional testing)}$ $= 1 \cdot 10^{-5} \text{ (standard functional testing)}$ $= 1 \cdot 10^{-3} \text{ (incomplete test/partial stroke)}$ $= 0.5$	
Assessment		
<p>The failure estimate is an update of the previous estimate in the 2003 handbook. Data from OREDA 2002 and input from operators indicate that the previous failure rate estimate for valves was too optimistic. Furthermore, part(i.e.approx.50%) of the failure rate reported under the sub-unit "control and monitoring" has now been included as part of the valve itself (as opposed to previously when this was all included under the pilot valve-the failure rate for pilot valve has been reduced correspondingly). This has resulted in a higher proportion of safe failures as compared to the previous estimate. It is assumed that the shutdown valves are de-energised to close.</p> <p>Data from RNNS for the period 2003-2004 for riser ESVs has been reviewed. Assuming annual testing, $a\lambda_{DU} = 3.5 \cdot 10^{-4}$ results (incl. pilot valve). This is somewhat higher than the data given in this handbook ($\lambda_{DU} = 2.9 \cdot 10^{-6}$ for complete ESV including pilot valve).</p> <p>The coverage factor for D failures have been set to 25%, due to registered detection methods in OREDA IV (i.e. failures detected by other means than "on demand" and during testing contribute towards the coverage factor).</p> <p>The P_{TIF} values are estimated based on expert judgments. The size of the P_{TIF} will vary depending on the completeness of the functional testing. Here, three (rough) alternatives are indicated, where for the smallest P_{TIF} (<i>extended functional test</i>) it is assumed that the test also includes a complete tightness test.</p> <p>The estimated r is based on reported failure causes in OREDA as well as expert judgments. A summary of some of the main arguments is provided in Section 2.4.</p>		

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

- Abiodun, S. Rivers (2021), impact of Drilling and Flaring on Lagos Citizens Along Badagry Riverine Settlers and Corridors. *Journal homepage: www. ijrpr. com ISSN, 2582, 7421.*
- A.C. Torres-Echeverría (2009), *Modelling and Optimization of Safety Instrumented Systems Based on Dependability and Cost Measures*. PhD-theses.
- A.C. Torres-Echeverría, S. Martorell and H.A Thompson (2009), *Design optimization of a safety-instrumented system based on RAMS+C addressing IEC61508 requirements and diverse redundancy*. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, p.162-179.
- A.C. Torres-Echeverria, S. Martorell and H.A Thompson (2009), *Modelling and optimization of proof testing policies for safety instrumented systems*. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(4), 838-854.
- Alkaim, A. F. & Al_Janabi, S (2019), Multi objectives optimization to gas flaring reduction from oil production. In *International conference on big data and networks technologies* (pp. 117-139). Springer, Cham.
- Amaechi, C. F. & Emejulu, M. J. (2021), Cost–Benefit Analysis of Associated Gas Flaring in the Niger–Delta Area of Nigeria (a case study of 1958–2004. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 25(3), 363-369.
- Asadi, J., Yazdani, E., Dehaghani, Y. H., & Kazempoor, P. (2021), Technical evaluation and optimization of a flare gas recovery system for improving energy efficiency and reducing emissions. *Energy Conversion and Management*, 236, 114076.
- Askhou, N. & Noureddine, R. (2020), Effects of proof tests on the safety performance of safety-instrumented systems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 34(3), 396-408.
- Bashir, L. Z. (2015), Find Optimal Solution For Eggcrate Function Based On Objective Function. *World Scientific News*, (10), 53-72.
- Baude, M., Colin, A. Foussard. A., & Duvernoy, J. (2021), *Chiffres clés du climat*. France, Europe et monde.
- Bengtsson, M. (2004), *Condition based maintenance systems: an investigation of technical constituents and organizational aspects*. Eskilstuna, Sweden: Mälardalen University.
- Bendine, K. (2016), Contribution to the study of active control of composite structures by incorporating intelligent materials, doctoral thesis, DJILLALI LIABES University, SIDI BEL ABBES.

BGR Energy study, Federal institute for geosciences and natural resources (2019), https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2019_en.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

Bogue, R. (2013), Sensors for condition monitoring: a review of technologies and applications. *Sensor Review* 33, 4 (2013), 295–299.

Brataas, M. *Management of the integrity of safety instrumented systems*. Ed. University of NTNU, p 51; 2014.

Brissaud, F., Vinuesa, C. and Folleau, C. (2018), Optimising proof test policy of redundant safetyrelated systems, 21st Congress on Risk Management and Dependability λμ21 Reims, October 16-18, 2018, France.

CEN - EN 13306 - Maintenance - Maintenance terminology | Engineering360.” [Online]. Available: <https://standards.globalspec.com/std/1297524/cen-en-13306>.

Chebila M. (2015), Modeling and evaluating the performance of safety instrumented systems with the consideration of the associated uncertainties. Ed. Université Hadj Lakhdar, Batna, p148.

David Green (2016), Poof testing ... A key performance indicator for designers and end users of Safety Instrumented Systems, Ed. Engineering Safety Consultants Limited, p: 16.

Décret 25 Aout, 2021 :
<https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2021/F2021066.pdf>

Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability engineering & system safety*, 51(3), 229-240

De Lira-Flores, J. A., López-Molina, A., Gutiérrez-Antonio, C., & Vázquez-Román, R. (2019). Optimal plant layout considering the safety instrumented system design for hazardous equipment. *Process Safety and Environmental Protection*, 124, 97–120. doi:10.1016/j.psep.2019.01.021

Deloux, E. (2008). “Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant,” Thèse de doctorat. Université de Nantes.

Dong, Y.L., GU, Y.J. and Dong, X.F. (2008), “Selection of optimum maintenance strategy for power plant equipment based on evidential reasoning and FMEA”, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 8-11 Dec. 2008, Singapore.

Emam, E. A. (2015). GAS FLARING IN INDUSTRY: AN OVERVIEW. *Petroleum & coal*, 57(5).

Emerson. (2016). SIS Functional Safety Maintenance and Proof Testing.

Esparza, Alejandro, and Monica Levy Hochleitner. (2010). A brief discussion over safety costs in new enterprises.

www.exida.com/images/uploads/CCPS_LA_2010_SIS_EsparzaHochleitner.pdf

Fioravanti, A., De Simone, G., Carpignano, A., Ruzzone, A., Mortarino, G., Piccini, M., & Bolado-Lavín, R. (2020). Compressor Station Facility Failure Modes: Causes, Taxonomy and Effects.

Gentile, M., & Summers, A. E. (2006). Random, systematic, and common cause failure: How do you manage them?. *Process safety progress*, 25(4), 331-338.

Gertsbakh, I. B. (1977). Models of preventive maintenance. Amsterdam : North-Holland.

Ghanooni, M. A. (2015). *Spurious activations of safety-instrumented systems* (Master's thesis, NTNU).

Goble, W. M. (2010). *Control systems safety evaluation and reliability*. Ed. Research Triangle Park: ISA.

Grall, A. (2003). Modélisation stochastique pour la maintenance conditionnelle: impact du mode de surveillance. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne, France, 2003.

GRIF Graphical Interface for Reliability Forecasting. Total, 2021.

Harris, D. D., & Fitzgerald, L. (2015). A life-cycle cost analysis for flooring materials for healthcare facilities. *Journal of Hospital Administration*, 4(4). doi:10.5430/jha.v4n4p92

Hauge, S., Lundteigen, M. A., Hokstad, P., & Håbrekke, S. (2010). Reliability prediction method for safety instrumented systems—pds method handbook, 2010 edition. *SINTEF report STF50 A, 6031*, 460.

Hokstad, P. et Corneliussen, K (2003). Reliability Prediction Method for Safety Instrumented Systems; PDS Method Handbook, 2003 Edition. SINTEF Report STF38 A 02420, SINTEF, Trondheim, Norway.

IAEA. (2007). Application of Reliability Centered Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants, p 87.

ICSI. (2009). Initiating event frequency and availability of safety barriers. France. Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle. https://www.icsi-eu.org/sites/default/files/2020-09/Icsi_cahier_FR_frequence-evenements_2009.pdf

Iddir, O. (2009). Evaluation de la probabilité de défaillance d'un système instrumenté de sécurité (SIS). Ed techniques d'ingénieur.

Innal, F. (2008). Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances Analyse critique de la norme CEI 61508, Thèse de Docteur de L'Université BORDEAUX 1.

Innal, F., Dutuit, Y., & Chebila, M. (2015). Safety and operational integrity evaluation and design optimization of safety instrumented systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 134, 32-50.

ISA. (2002) Guidance for testing of process sector safety instrumented functions (SIF) implemented as or within safety instrumented systems (SIS). Technical report.

ISA-TR84.00.02. *Safety instrumented functions (SIF)-safety integrity level (SIL) Evaluation techniques part2: Determining the SIL of a SIF via Simplified Equations* Technical Report, Research Triangle Park, NC: The Instrumentation, Systems, and Automation Society 2002.

ISA-TR84.00.02. *Safety instrumented functions (SIF)-safety integrity level (SIL) Evaluation techniques part3: Determining the SIL of a SIF via Fault tree Analysis* Technical Report, Research Triangle Park, NC: The Instrumentation, Systems, and Automation Society 2002.

ISA-TR84.00.02. *Safety instrumented functions (SIF)-safety integrity level (SIL) Evaluation techniques part 4: Determining the SIL of a SIF via Markov analysis* Technical Report, Research Triangle Park, NC: The Instrumentation, Systems, and Automation Society 2002.

Itoua, P. V., Manguet, D. E. N., & Mouanda-Mouanda, G. (2021). Impact of Gas Production, Utilization and Flaring on Economic Growth: Evidence from the Republic of Congo. *Open Journal of Business and Management*, 9(3), 1492-1509.

Jardine, A. K., and Tsang, A. H. (2013), Maintenance, replacement and reliability: theory and applications. CRC press.

Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1483-1510.

Kawauchi, Y., & Rausand, M. (1999). Life Cycle Cost (LCC) analysis in oil and chemical process industries. *Toyo Engineering Corp, Chiba*.

Kazemimanesh, M., Baldelli, A., Trivanovic, U., Popovicheva, O., Timofeev, M., Shonija, N., & Olfert, J. S. (2021). Particulate emissions from turbulent diffusion flames with entrained droplets: A laboratory simulation of gas flaring emissions. *Journal of Aerosol Science*, 157, 105807.

Kothamasu, R., Huang, S. H., & VerDuin, W. H. (2006). System health monitoring and prognostics—a review of current paradigms and practices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(9-10), 1012-1024.

Lade, G., & Rudik, I. (2017). Efficient Environmental Regulation in the Unconventional Oil Industry. *Agricultural Policy Review*, 2017(3), 1.

Léger, J. B. (1999). *Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production: proposition d'un cadre formel de modélisation*. PhD thesis, Université Henri Poincaré de Nancy, 1999.

Le Mortellec, A. (2014). *Proposition d'une architecture de surveillance" active" à base d'agents intelligents pour l'aide à la maintenance de systèmes mobiles-Application au domaine ferroviaire*, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

Liu, Y. L., Rausand, M. (2011). Reliability assessment of safety instrumented systems subject to different demand modes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24 (1), 49–56.

Loi n° 01-21 du 22 décembre 2001 portant loi de finances pour 2002. <https://www.joradp.dz/FTP/Jo-Francais/2002/F2002086.pdf>

Loi n° 05-07 relative aux hydrocarbures : <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/alg53264.pdf>

Lundteigen, M. A. & Rausand, M. (2008). Spurious activation of safety instrumented systems in the oil and gas industry: Basic concepts and formulas. *Reliability engineering & system safety*, 93(8), 1208-1217.

Lundteigen, M.A. (2008), *Safety instrumented systems in the oil and gas industry: Concepts and methods for safety and reliability assessments in design and operation*. PHD-theses at NTNU.

MATLAB, version R2015a. The MathWorks, Inc: www.mathworks.com.

Macheri, W. (2011), “Performance evaluation of safety instrumented system to imprecise parameters”, doctoral thesis, National School of Engineers, University of Tunis.

Mitsubishi Heavy Industries, LTD. MCEC (REV.03) DNG N° 2620 B231-00100 (Oct.29.2002).

Mitsubishi Heavy Industries, LTD. MCEC (REV.03) Manuel d'Exploitation / Volume-1-2.

Mobley, R. K. (1990). *An introduction to predictive maintenance*. New York : Van Nostrand Reinhold.

Muller, A. (2005). *Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic*. PhD thesis, Nancy 1.

Norme CEI 61508, *Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / électroniques / électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 1 à 7*, octobre 1998-2000. *Commission Electrotechnique Internationale*, Genève, Suisse.

Norme CEI 61511, *Sécurité fonctionnelle - Systèmes instrumentés de sécurité pour le domaine de la production pour processus – Parties 1 à 3*, janvier 2003-juillet 2003. *Commission Electrotechnique Internationale*, Genève, Suisse.

Obi, N., Bwititi, P., & Nwose, E. (2021). Study proposal of the impact of gas flaring on health of communities in Delta state Nigeria. *International Journal of Scientific Reports*, 7(9), 468-472.

Ogwu, C. E., Oluwaferanmi, F. M., & Johnson, A. I. (2021). IMPACT OF GAS FLARING ON CLIMATE CHANGE. *GSJ*, 9(5).

Osuoha, C. A., & Fakutiju, M. A. (2017). Gas flaring in Niger Delta Region of Nigeria: Cost, ecological and human health implications. *Environmental Management and Sustainable Development*, 6(2), 390.)

Ouki, M. (2019). Algerian Gas in Transition: Domestic transformation and changing gas export potential. Oxford Institute for Energy Studies.

Pehrsson, A. and Al-Najjar, B. (2005). *Creation of Industrial Competitiveness: CIC 2001-2004*. Växjö University Press.

Qi, M., Kan, Y., Li, X., Wang, X., Zhao, D., & Moon, I. (2020). Spurious activation and operational integrity evaluation of redundant safety instrumented systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 197, 106785.

Redutskiy, Y. (2017). Optimization of safety instrumented system design and maintenance frequency for oil and gas industry processes. *Management and Production Engineering Review*, 8.

Riauke, J., & Bartlett, L. M. (2008). An offshore safety system optimization using an SPEA2-based approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 222(3), 271-282.

Rudall Blanchard Associates (REV : 1), Etude d'Impact Environnemental RGTE ; 2005.

Rudall Blanchard Associates (VER : 1), *Etude de Dangers de Projet RGTE* ; 2005.

Salazar, D., Rocco, C.M. and Galvan, B.J. (2006), "Optimization of constrained multiple-objective reliability problems using evolutionary algorithms", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91 No. 9, pp. 1057-1070

Sallak, M. (2007). *Évaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).

Sallak, M., Simon, C., & Aubry, J. F. (2008, March). Conception optimale des systèmes instrumentés de sécurité : une approche par les blocs diagrammes de fiabilité. In *7ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes, MOSIM 08* (p. CDROM).

Sholette, B. (2015). Proof Testing Level Instruments Partial proof testing of level instruments can save millions of dollars while maintaining required safety ratings – Endress+Hauser and Craig McIntyre, *Chemical Industry Manager* – Endress+Hauser.

- Silvana, D.C., SasantiMusyafa, G.F.A., Soeprijanto, A. and Biyanto, T.R. (2018), “Duelist algorithm for optimisation of safety instrumented system at distillation column based on RAMS þ C”, *Safety and Reliability*, Vol. 37 Nos 2-3, pp. 1-17.
- SINTEF. (2006). Reliability Data for safety instrumented systems. Ed. PDS Data handbook.
- Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of loss prevention in the process industries*, 19(5), 494-506.
- Srivastava, U., Oonk, D., Lange, I., & Bazilian, M. (2019). Distributional impacts of the North Dakota gas flaring policy. *The Electricity Journal*, 32(8), 106630.
- Standard, N.O.R.S.O.K. (1998). Regularity management & reliability technology. *Norwegian Technology Standards Institution, Oslo, Norway*.
- Sukhwinder, S.J. and Bikram, J.S. (2014), “An approach to enhance availability of repairable systems: a case study of SPMs”, *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 31 No. 9, pp. 1031-1051.
- Sung Kyu, K. and Yong Soo, K. (2013), “Evaluation process for the hardware safety integrity level”, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 7 No. 4, pp. 547-551, available at: scholar.waset.org/1999.8/5621.
- Surange, V., & Kokku, A. K. (2018, November). Best Practice-2004 Voting Logic for Centrifugal Compressors Radial Vibration Trip. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. OnePetro.
- Thomas, E. (2009). *Contribution à la prise de décision dynamique en maintenance prévisionnelle par formalisation d'un principe d'opportunité*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, France.
- Thuy Le N. Adjadj A. Chaumette S., Bouchet S. et De Dianous V. (2008). Evaluation des performances des barrières techniques de sécurité. Ed INERIS, p 59.
- Touahar, H. (2015), “Maintenance of instrumented security systems (SIS): case study”, Master thesis, HADJ-LAKHDAR University, Batna, p. 89.
- Touahar, H., Ouazraoui, N., Khanfri, N. E. H., Korichi, M., Bachi, B., & Boukrouma, H. E. (2021). Multi-objective optimization of safety instrumented systems maintenance strategy: a case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*.
- Udok, U., & Akpan, E. B. (2017). Gas flaring in Nigeria: Problems and prospects. *Global Journal of Politics and Law Research*, 5(1), 16-28.
- Venkatachalam, V., & Milke, M. (2021). international comparisons of gas flaring. Candian energy center; p 06

Wang, L., Chu, J., & Mao, W. (2008). A condition-based order-replacement policy for a single-unit system. *Applied mathematical modelling*, 32(11), 2274-2289.

William M. Goble (2010) Control Systems Safety Evaluation and Reliability Third Edition, p 476.

World Bank Group. (2014). Global Gas Flaring Reduction, a Public – Private Partnership: A Voluntary Standard for Global Gas Flaring and Venting Reduction. 4th Report.

YOKOGAWA (REV. 2). Distributed Control System (DCS) graphic display plan, Mitsubishi, Heavy Industries, LTD. MCEC; 2003.

Zaresharif, M., Vatani, A., & Ghasemian, M. (2021). Evaluation of Different Flare Gas Recovery Alternatives with Exergy and Exergoeconomic Analyses. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-20.

Zille, V. (2009). Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants., Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, Institut Charles Delaunay.

RELIABILITY PAPER

Multi-objective optimization of safety instrumented systems maintenance strategy: a case study

Multiobjective optimization approach

Hafed Touahar, Nouara Ouazraoui and Nor El Houda Khanfri
LRPI Laboratory, Safety Department, Health and Occupational Safety Institute, University of Batna-2, Batna, Algeria

Mourad Korichi
Process Engineering Department, Kasdi Merbah Ouargla University, Ouargla, Algeria

Bilal Bachi
Industrial Security, Health and Occupational Safety Institute, University of Batna-2, Batna, Algeria, and

Houcem Eddine Boukrouma
Department of Petrochemistry and Process Engineering, University of Skikda, Skikda, Algeria

Received 19 March 2020
Revised 5 September 2020
7 November 2020
Accepted 29 December 2020

Abstract

Purpose – The main objective of safety instrumented systems (SISs) is to maintain a safe condition of a facility if hazardous events occur. However, in some cases, SIS's can be activated prematurely, these activations are characterized in terms of frequency by a Spurious Trip Rate (STR) and their occurrence leads to significant technical, economic and even environmental losses. This work aims to propose an approach to optimize the performances of the SIS by a multi-objective genetic algorithm. The optimization of SIS performances is performed using the multi-objective genetic algorithm by minimizing their probability of failure on demand PFDavg, Spurious Trip Rate (STR) and Life Cycle Costs (LCCavg). A set of constraints related to maintenance costs have been established. These constraints imply specific maintenance strategies which improve the SIS performances and minimize the technical, economic and environmental risks related to spurious shutdowns. Validation of such an approach is applied to an Emergency Shutdown (ESD) of the blower section of an industrial facility (RGTE- In Amenas).

Design/methodology/approach – The optimization of SIS performances is performed using the multi-objective genetic algorithm by minimizing their probability of failure on demand PFDavg, Spurious Trip Rate (STR) and Life Cycle Costs (LCCavg). A set of constraints related to maintenance costs have been established. These constraints imply specific maintenance strategies which improve the SIS performances and minimize the technical, economic and environmental risks related to spurious shutdowns. Validation of such an approach is applied to an Emergency Shutdown (ESD) of the blower section of an industrial facility (RGTE- In Amenas).

Findings – A case study concerning a safety instrumented system implemented in the RGTE facility has shown the great applicability of the proposed approach and the results are encouraging. The results show that the selection of a good maintenance strategy allows a very significant minimization of the PFDavg, the frequency of spurious trips and Life Cycle Costs of SIS.

Originality/value – The maintenance strategy defined by the system designer can be modified and improved during the operational phase, in particular safety systems. It constitutes one of the least expensive investment



strategies for improving SIS performances. It has allowed a considerable minimization of the SIS life cycle costs; PFD_{avg} and the frequency of spurious trips.

Keywords Safety instrumented systems, Spurious trip rate, Maintenance, Multi-objective optimization, Genetic algorithms

Paper type Research paper

Nomenclature and notations

T_1 :	Test interval.	MTTR _{SD} :	Mean Time to Repair of safe detected failures.
λ :	Failure rate.		
λ_D :	Dangerous failure rate.	β_D :	Beta factor for dangerous failures.
λ_{DD} :	Dangerous detected rate.		
λ_{DU} :	Dangerous undetected rate.	β_{SD} :	Beta factor for safe (spurious) detected failures.
λ_S :	Safe failure rate.		
λ_{SD} :	Safe detected rate.	β_{SU} :	Beta factor for safe (spurious) undetected failures.
λ_{SU} :	Safe undetected rate.		
λ_{STD} :	Spurious trip detected rate.	LCC _{avg} :	Life Cycle Costs average
λ_{STU} :	Spurious trip undetected rate.	PFD _{avg} :	Probability of failure on demand average
λ_{NONC} :	No critical failure rate.		
λ_{SO} :	Spurious operation rate.	SD _{Flare} :	Cost of flared gas per hour.
ALARP:	As Low As Reasonably Practical	SD _{LOSS} :	Lost production costs per hours.
		SD _{TIME} :	Shut down Time.
$C_{STRTotal}$:	Total Cost of spurious trip rate	SIF:	Safety Instrumented Function
		SIS:	Safety Instrumented System
C_{STRSD} :	Cost loss production caused by spurious trip.	STR _{FE} :	Spurious Trip Rate of Final Element subsystem
$C_{STRFlare}$:	Flare gas costs caused by spurious trip.	STR _{LS} :	Spurious Trip Rate of Logic Solver subsystem
C_{SD} :	Cost of production loss during shut-down.	STR _{Si} :	Spurious Trip Rate of Sensor subsystem

1. Introduction

Industrial plants within the Algerian energy sector are becoming technically more and more complex and the potential of hazard effects increases accordingly if the hazard flows are not properly managed. The risk management related to these plants requires the implementation of control measures commonly known as safety barriers. Among these barriers, Safety Instrumented Systems (SISs) which are used to ensure the functional safety of facilities by reducing risks to levels judged tolerable or acceptable.

The SIS activation in industrial processes is carried out after the occurrence of specific deviations or hazardous situations compared to normal operations. However, in some cases, SISs are activated even with the absence of deviations or demand: these are mainly known as spurious activations.

The unpredictable nature of these activations makes them critical, feedback on spurious trips (STR) (Rudall Blanchard Associates, 2005) has shown that their occurrence leads to significant technical, economic losses, e.g. production loss, environmental pollution, flaring penalties or fees, maintenance costs, process costs, decrease in the confidence level of the SIS, customer complaints, etc.). On industrialists' point of view, it is, therefore, indisputable that this type of spurious activations should be reduced as much as possible. Indeed, optimizing the SIS performances constitutes a support tool for decision making, whether in engineering or economics.

Although, IEC 61508 (2016) and IEC 61511 (2016) standards have gradually become the international standard for safety-related systems in several industrial sectors, it did not take into consideration the spurious activations while the evaluation of SIS performances.

However, other works, mainly the PDS method (SINTEF, 2006), has focused on the inclusion of production loss analysis as a consequence of spurious activations, in order to achieve a compromise between safety and availability. This should be assessed in relation to the life cycle cost of the system.

In order to optimize SIS performances, several works have been developed in the literature using several SIS optimization techniques, such as (Macheri, 2011; Ouazraoui and Nait Said, 2019; Brissaud *et al.*, 2018; Sukhwinder and Bikram, 2014; Sung Kyu and Yong Soo, 2013).

Torres Echeverria (2009) proposed two techniques of SIS optimization: SIS design optimization and maintenance optimization in particular testing policy. System design is improved by choosing an adequate level of redundancy in the subsystems, and by choosing among specific components available having different reliability specifications (failure rates, diagnostic coverage, etc.). Therefore, the available reliability values are discrete values. There are some studies in which reliability allocation is continuous like (Salazar *et al.*, 2006). However, this is difficult to apply in real cases, where components must be selected from the available options on the market. This limits the range of choice to a few discrete cases (Torres-Echeverria, 2009).

Testing is an activity that may improve the SIS performances without actually modifying the design; it requires the selection of optimal strategies, which include the testing frequency and its strategies. Too much tests can lead to negative effects, such as significant shutdown and transient events that can increase the spurious trips. This has a negative impact on the lifecycle cost and on the operator's confidence granted to the safety system (Torres-Echeverria, 2009).

Indeed, Torres-Echeverria *et al.* (2009a) have proposed a new model for PFD, STR, LCC quantifications and its integration in a multi-objective optimization of Proof tests using genetic algorithms in the SIS design phase. A second multi-objective optimization model to mention the effect of components redundancy diversification of SIS subsystems architectures based on RAMS + C during the design phase have been proposed (Torres-Echeverria *et al.*, 2009b).

What is more, Torres-Echeverria *et al.* (2011) propose two multi-objective optimization models for the design and testing of SISs with MOON voting architectures. The first model consists of optimizing the system design by allocating redundancy and selecting components. This model allows quantification of PFD and explicit modeling of CCF, diagnostic coverage, and changes in the mean cycle of component testing. The reliability quantification based on binomial distribution models is limited to independent and identical components. The second model concerns the optimization of testing policies by adding voting as an additional decision variable in addition to PFDavg and STR. The developed models made it possible to find a compromise between the SIS performance indicators, namely the PFDavg and STR and LCC, and to ensure an efficient SIS design.

In separate work, Torres-Echeverria *et al.* (2012) have proposed two models of SIS design and test policy optimization using "MooNvotes redundancies" using a multi-objective genetic algorithm. The objective functions to be optimized are PFDavg, STR, and LLC, which is carried out by new models of PFDavg and STR, time-dependent. The modeling includes common cause failures and diagnostic coverage.

The optimization methodology applied in two optimization cases: system design optimization with redundancy allocation and component selection with the ability to choose the required number of voting components (M) needed to trigger the safety function. The second case concerns the optimization of the test policies with the addition of the voting level (M) as a decision variable. Both optimization cases were performed for both systems with MooN redundancies and systems with parallel redundancies. Optimization performed using the NSGA-II multi-objective genetic algorithm. The obtained results showed that the

inclusion of the voting level (M) as an additional decision variable (in both cases of optimization) makes it possible to obtain the compromise between the three objectives and thus to implement SIS which is a good balance between safety, reliability, and cost.

After a while, [Innal *et al.* \(2015\)](#), proposed a new analytical formulation for estimating the SIS performance in terms of PFD_{avg} , PFH, PFS_{avg} and STRs valid for all $K00N$ architectures during the design phase. A multi-objective optimization based upon the new developed formulations of the indicators under a set of constraints PFD_{avg} , STR, purchase cost and test cost.

Lately, [Redutskiy \(2017\)](#) proposed the use of a Markovian model that took into account the following events: device failures and repairs, technological incidents and restorations, and periodic system maintenance. The proposed modeling and design approach is useful for the design phase of petroleum facilities during the development of safety system specifications. The author tackled the problem of optimizing safety measures inherent in the SIS in order to formulate simple requirements that could constitute starting point for detailed engineering design and help companies to refine the choice of suppliers for SIS components.

Inspired by Torres' model ([Torres-Echeverria, 2009](#)) and in order to describe the impact of diversification of redundancy in the optimization of SISs design based upon RAMS + C, [Silvana *et al.* \(2018\)](#) proposed the application of this model based on reliability, availability, maintainability, safety and costs calculation to a distillation column using Duelist algorithm.

To conclude, most of these studies are dedicated to the design phase where the SIS is not yet implemented which limits the decisions making on improving the SIS performance or making it difficult in operational phase. Indeed, some issues arise during the operational phase and are not taken into consideration in the design stage such as operational and environmental conditions, the decision factors taken into account for the choice of the maintenance strategy are for example security, reliability, economic and maintainability factors, . . . etc ([Dong *et al.*, 2008](#)).

Moreover, some facilities were implemented before the first work upon spurious activations of the SIS in 2008 ([Lundteigen and Rausand, 2008](#); [Torres-Echeverria, 2009](#); [Riauke and Bartlett, 2008](#)) where the spurious trips were neither known nor taken into consideration by the industrialists particularly in the oil and gas field.

This paper consists in proposing a multi-objective approach using genetic algorithms to optimize the SIS performance and its LCC costs implemented in the RGTE facility that has been commissioned in 2004 to recover gases destined to flaring. Using GA as an optimization method may be justified by the fact that GA makes up a powerful tool for solving strongly non-linear and discontinuous problems and non-explicit functions. GAs are effective because they do not evolve one solution but a total population of solutions. Compared to other traditional methods based on an analytical approach, GAs based on an iterative and heuristic approach. In this, little information is needed for their use. Genetic algorithms enable multi-objective optimization: all objectives are equally important and optimized at the same time. This consequently gives a set of Pareto-optimal solutions. In this set, no solution is better than another: all are optimal and differ only in the trade-offs between their goals. Thus, the decision maker has several options to choose the most appropriate solution.

This study is considered as a first approach which consists to:

- (1) Modeling of SIS in an operational phase,
- (2) The SIS performance indicators assessed on the basis that the SIS components are non-identical, repairable, and have a complex configuration,
- (3) SIS performance optimization is a multi-objective problem under multi-constraints.

2. Safety instrumented systems

IEC 61508 (2010) defines systems for safety applications as “an E/E/EP (electrical/electronic/programmable electronic/electronic) system that includes all system elements necessary to fulfill the safety function”. A SIS consists of any combination of (Figure 1):

- (1) *Subsystem S (Sensor)*: it consists of a set of input elements (sensors, detectors) that monitor the evolution of the physico-chemical parameters representing the process behavior (temperature, pressure, flow, level, etc.). This evolution is detected by the concerned sensors, which send a signal to the LS (Logic-Solver) subsystem.
- (2) *LS subsystem*: this subset of logic elements performs the decision-making process which ends with the activation of the third FE (Final Element) subsystem.
- (3) *FE subsystem*: these elements act directly (emergency stop valves) or indirectly (solenoid valves) on the process to neutralize its drift by generally bringing the system to a stop (safe state) after a time limit to be specified for each safety function.

A Safety Instrumented Function (SIF) is a function to be performed by a SIS which is intended to ensure or maintain a safe condition of the equipment to be protected (EUC: Equipment Under Control) against a specific hazardous event.

A SIS can implement one or more SIF. For a given situation, several safety functions may lead to a reduction in hazard’s occurrence frequency.

The functional architecture of a SIS is a set of SIF that includes three basic functionalities, detection (or measurement), processing (or decision) and actuation.

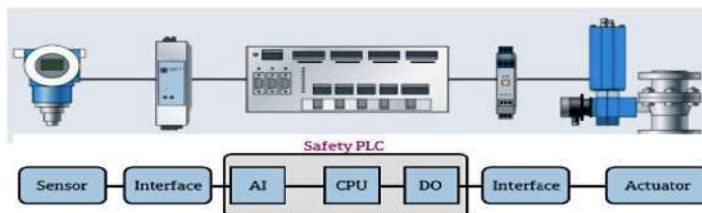
2.1 SIS failures classification

IEC 61508 (2010) standard adopts a classification that contains two categories of failures:

- (1) Physical failures (random equipment) caused by the ageing of equipment;
- (2) Functional failures (systematic) which may be due to design failures introduced during one of the system life cycle phases or interaction failures: these failures are initiated by human errors during exploitation (operation), maintenance, i.e.

All failures (random equipment failures and systematic failures), depending on their effects, can be classified into one of two following categories: safety failures (safe failures) or hazardous failures (dangerous or hazardous failures) (Figure 2).

According to SINTEF (2006), a more refined and more realistic classification than the previous one is presented, since it takes into account spurious failures and non-critical failures, which are defined below. This classification is summarized by the tree structure (tree diagram) given in (Figure 3).



Source(s): (Emerson Delta V SIS, 2018)

Figure 1.
Example SIS: (AI:
Analog Input, CPU:
Central Processing
Unit, DO: Digital
Output)

The SINTEF PDS method considers, at the component level, three types of failures: (dangerous) hazardous, spurious and non-critical. From this classification, a classification of failure rates has been deduced.

Spurious failures are not listed in the IEC 61508 classification, whereas SINTEF classification considers these failures as a subclass of safe failures. The examples, often mentioned of spurious trip are airbag spurious operation or a spurious inversion of a reactor (engine) thrust flow in mid-flight are sufficient to show that this classification is more realistic (Torres-Echeverria *et al.*, 2009a).

2.2 SIS spurious trip

The first monothematic study that deals with the subject of spurious SIS failures is the one presented by Lundteigen and Rausand (2008). In their paper, the authors used the collective term “Spurious Activation” which indicates that there is some transition from one state to another and the term “Spurious” indicates that the causes of the trip are false, incorrect and unreal. In process facility, spurious activations of the SISs can cause partial or complete shutdown of the installations, hence, it is therefore required to reduce the occurrences number in order to:

- (1) Avoid production losses due to shutdowns,
- (2) Avoid risks that may arise during the restart phase.

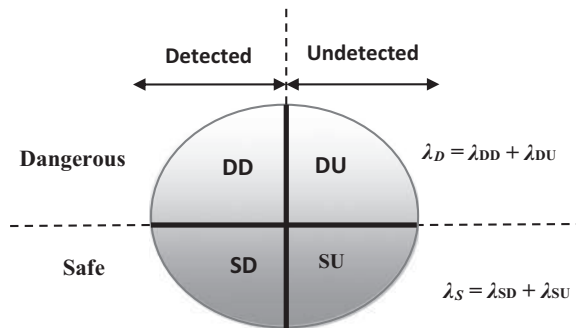


Figure 2. Failures classification according to IEC 61508 (2010)

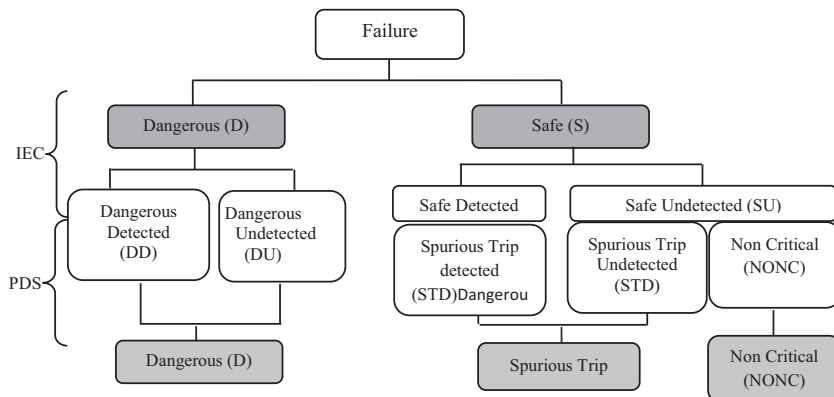


Figure 3. Classification of failures (SINTEF, 2006)

According to [Lundteigen and Rausand \(2008\)](#), there are three different types of inadvertent (spurious) activations of the SIS ([Figure 4](#)):

- (1) *Spurious Operation (SO)*: A Spurious Operation (SO) is an activation of an SIS element in individual manner in the absence of a specific activation request process (actual deviations).
- (2) *Spurious Trip*: A spurious trip is an activation of one or more SIS elements giving that SIF is performed in the absence of a specific activation request process (actual deviations).
- (3) *Spurious shutdown*: a spurious shutdown is a partial or complete shutdown of the systems in the absence of a specific activation request process (actual deviations).

2.3 Causes of spurious activations

According to [Lundteigen and Rausand \(2008\)](#), the main causes of SIS's spurious activations are represented by an influence diagram as shown in [Figure 5](#).

A spurious operation, spurious trip, and spurious shutdown are presented as being performance nodes (rounded rectangles), since their occurrence rates are performance measures that should be minimized in order to reduce production losses.

Chance nodes (circles) represent the factors that influence spurious activations rates. These factors cannot be monitored in direct way, but can be influenced indirectly through a set of decisions.

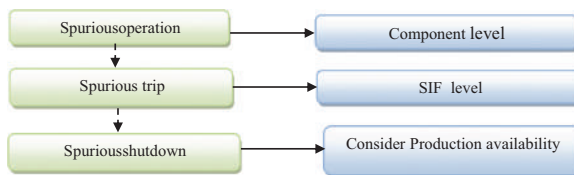


Figure 4. Spurious activations types ([Touahar, 2015](#))

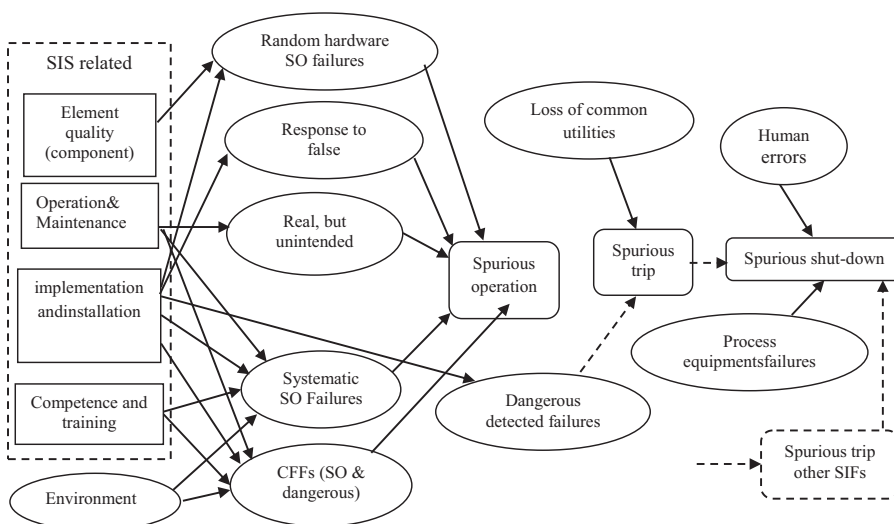


Figure 5. Decisions and factors influencing spurious activation ([Lundteigen and Rausand 2008](#))

A decision may be to choose an item with a higher reliability than specified. Another decision may be to invest more in staff training and competence to reduce human error during operation and maintenance. The relevant decisions are shown in Figure 5 as decision nodes (rectangles). The arrows indicate the relationships between decisions, influencing factors, and performance measures. The dotted (dashed) arrows in Figure 5 show that the link is presented, under certain conditions, for example, for a given material configuration.

3. Modeling and optimization of safety instrumented system performances

3.1 SIS performances optimization

An optimization problem, noted $P(X, f)$ is characterized by a non-empty feasible or admissible set X and an objective function f that associates a scalar in \mathbb{R} of each element x of the set X . The elements of X are called feasible solutions.

Solving problem $P(X, f)$, means finding among the feasible solutions one that minimizes or maximizes f . In the case of a minimization problem, finding a solution $x^* \in X$ such that $f(x) \geq f(x^*)$ for any element x in X . Such a solution is said to be optimal and will be noted $x(X, f)$ (Belhou, 2015).

The feasible set X is usually defined as the part of R^n where n is a positive number denoting the size of the problem. Feasible solutions can then be represented as vectors whose n components are the variables of the problem. The set X is commonly delimited by a system of inequalities called constraints of the problem. Constraints are constructed using combinations of the variables, and allow characterizing the properties common to the solutions of X in order to distinguish them among all the solutions of R^n (Belhou, 2015).

The description of set X is therefore implicit. Linear programs are probably the best known optimization problems tools. The objective function and constraints of these problems are linear (Gueret *et al.*, 2000).

According to Sarker and Newton (2008), optimization problems can be classified according to some main characteristics:

- (1) The number of objectives (Mono-objective, Multi-objective) and constraints (inequality, equality constraint),
- (2) The type of design variables (continuous, discrete or mixed),
- (3) The mathematical properties of all functions (linearity or not, convexity and differentiability),
- (4) And the type of data used.

Figure 6 illustrates the classification of optimization problems.

Among optimization problems, multi-objective optimization (MOP) is commonly used in the multiple cases, for example, the design of complex hardware/software systems such as emergency shutdown systems (ESD), etc. The design costs of such systems often need to be minimized, while seeking maximum performance (Gan *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2018; Bram and Philip, 2019; Umamaheswari *et al.*, 2018; Sharma and Mukherjee, 2019).

Depending on the scope, other objectives may be important, such as reliability, availability, maintenance costs, i.e. and can be explicitly defined as separate optimization criteria or formulated as constraints.

The general MOP consists of a set of n parameters (decision variables), a set of k objective functions and a set of m constraints. The objective functions and constraints are functions of the decision variables. The optimization objective is:

$$\text{Minimize: } y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_m(x)), \quad m \leq 2 \quad (1)$$

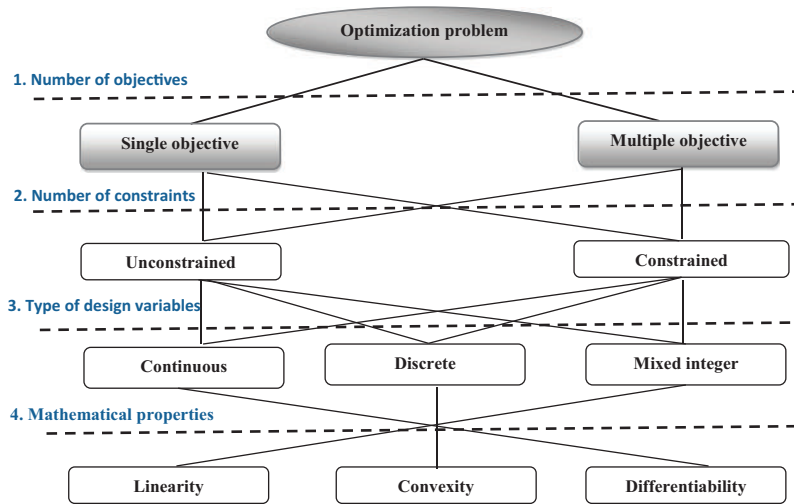


Figure 6.
Classification of
optimization problems
(Keller, 2018)

$$\text{Under constraints of: } e = e(x) = (e_1(x), e_2(x), e_3(x), \dots, e_m(x)) \leq 0 \quad (2)$$

where: $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in X$ and $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_k) \in Y$

While, x is the decision vector, y is the objective vector, X is referred to as a decision space and Y is referred to as the objective space (Zitzler, 1999). The constraints $e(x) \leq 0$ determine the set of feasible solutions.

The criteria allow the determination of which solutions are optimal among all the solutions in the feasible space based on Pareto's concept of dominance and optimality. These allow comparing any two solutions in the research area in terms of their multiple objectives and determining which ones are optimal. According to Deb (2001), one solution A dominates another solution B if:

- (1) Solution A is not worse than B in all objectives, and
- (2) Solution A better than B in at least one objective

In case of minimization, it is about:

$$f_i(A) \leq f_i(B) \text{ for all } i \in \{1 \dots n\}, \text{ and} \quad (3)$$

$$f_i(A) < f_i(B) \text{ for at least } i \in \{1 \dots n\}. \quad (4)$$

we say therefore that: $A < B$

In our case, the optimization problem consists in minimizing the following objectives: probability of failure on demand, spurious trip rate and life cycle cost:

$$Y = f(x) = (\text{PFD}_{\text{avg}}(x), \text{STR}_{\text{avg}}(x), \text{LCC}(x)) \quad (5)$$

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (6)$$

where X represents a vector of whole numbers

$$\text{Under constraints: } L_i \leq X_i \leq U_i \text{ pour } i = 1, \dots, n \quad (7)$$

The problem is combinatorial (components choice), and stochastic (components failure rate), it is there for a discrete optimization.

3.2 SIS performances modeling

3.2.1 *PFD_{avg} and STR modeling.* Improving safety is necessary, but it should not be forgotten that the availability of facilities is in most cases as important as safety. Finding a compromise between these two concepts is a permanent problem for industrialists. In order to achieve this, several methods have been developed to model and assess the performance indicators of safety systems, in particular SIS, such as PFD_{avg} and STR considering complex *KooN* architectures.

The probability of failure on demand PFD_{avg} is the average value of the instantaneous probability of failure on demand PFD(*t*) over time period (TI) between two consecutive tests. This probability is expressed as follows (Iddir, 2009):

$$\text{PFD}(t) = P_r(T \leq t) = F(t) = 1 - R(t) = 1 - A(t) \quad (8)$$

so,

$$\text{PFD}_{\text{avg}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \text{PFD}(t) dt = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} F(t) dt = 1 - \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} A(t) dt \quad (9)$$

The calculation formulas (using reliability block diagrams) which allow the assessment of the overall PFD of each subsystem are as follows:

$$\text{Bloc in parallel : PFD}_{\text{global}} = \prod_{i=1}^n \text{PFD}_i \quad (10)$$

$$\text{Bloc in series : PFD}_{\text{global}} = \sum_{i=1}^n \text{PFD}_i \quad (11)$$

The PFD_{avg} of SIS is deduced from the sum PFD_{avg} of different subsystems of which it is composed and according to their architecture (*KooN*) and the availability of reliability data (λ , MTTR, TI, etc.):

$$\text{PFD}_{\text{avg}} = \text{PFD}_{\text{avg}}(S) + \text{PFD}_{\text{avg}}(LS) + \text{PFD}_{\text{avg}}(FE) \quad (12)$$

The spurious trip rate STR is defined as the average number of the spurious activations of the safety instrumented function (SIF) per unit of time

The STR of a well-defined safety function provided by a given SIS is determined by calculating and combining the STR of its three subsystems (S, LS and FE). This can be expressed by the following general formula:

$$\text{STR}_{\text{moySIS}} = \text{STR}_{\text{moy}}(S) + \text{STR}_{\text{moy}}(LS) + \text{STR}_{\text{moy}}(FE) \quad (13)$$

Of course, each of these three subsystems is represented by *KooN* architecture (Lundteigen and Rausand, 2008).

For the estimation of the value of STR and using the binomial approach, the following formulas are used (Innal *et al*, 2015):

$$\text{STR}_{\text{KooN}} = A_N^K \lambda_{\text{Sind}}^K \prod_{i=1}^{K-1} \text{MDTS}_{i001} + \beta \lambda_{\text{SU}} + \beta_D \lambda_{\text{SD}} \quad (14)$$

with:

$$A_N^{N-K+1} = \frac{N!}{(K-1)!} \quad (15)$$

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (16)$$

$$\lambda_{Dind} = (1 - \beta)\lambda_{DU} + (1 - \beta_D)\lambda_{DD} \quad (17)$$

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU} \quad (18)$$

$$\lambda_{Sind} = (1 - \beta_{SU})\lambda_{SU} + (1 - \beta_{SD})\lambda_{SD} \quad (19)$$

$$MDT_{i001} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR \quad (20)$$

$$MDTS_{i001} = \frac{\lambda_{SU}}{\lambda_S} \left(\frac{T_1}{2} + MRTS \right) + \frac{\lambda_{SD}}{\lambda_D} \cdot MTTRS \quad (21)$$

Multiobjective
optimization
approach

3.2.2 SIS life cycle cost modeling. Finding the best compromise between availability and operational and lifecycle costs of SISs is a major concern not only for maintenance managers but also for manufacturers. In fact, lifecycle costing is essential to the successful implementation of any safety system.

Achieving a level of safety deemed tolerable is a crucial target, but system implementation must respect the principle of ALARP (As Low As Reasonably Practical) which is based on the demonstration that the effort put into implementing all the reduction measures considered reasonable for an additional risk reduction is not disproportionate to the benefits to be obtained (HSE, 2008).

According to (Lydersen and Aaro, 1989) the LCC must include not only the initial acquisition cost, but also the operating costs:

$$L_{CC} = L_{AC} + L_{SC} + L_{UC} \quad (22)$$

where:

L_{AC} = Life Acquisition Cost.

The acquisition cost includes the cost of the initial investment: equipment cost, and the design cost, installation and commissioning costs.

L_{SC} = Life Support Cost.

This cost includes resources for operation and maintenance and their annual cost over the operational life.

L_{UC} = Life Unavailability Cost.

The production loss due to spurious trip is included in this cost. However, the expected costs due to potential accidents caused by hazardous situations; i.e. the cost of safety outages is not included.

The aim of this work is to minimize the periodic testing costs and the loss production costs due to ESD spurious trips of the blower section of RGTE by minimizing the PFD_{avg} , STR as well as LCC_{avg} . This can be done by acting on the maintenance policy on the one hand and on the vote of the ESD architecture on the other hand.

For periodic testing costs, they include the cost of periodic testing (C_T) and corrective maintenance costs (C_{CM}):

$$C_{T\&CM} = C_T + C_{CM}. \quad (23)$$

with:

$$C_T = \sum_{\forall ij} \frac{1}{T_1} C_{ij}^T N_{ij} \quad (24)$$

$$C_{CM} = \sum_{\forall ij} f_{ij}^{CM} C_{ij}^{CM} N_{ij} \quad (25)$$

T_1 is the duration between two periodic tests,

f_{ij} is the repair frequency given by $f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^T}{\lambda_{ij}^T}$, while λ_{ij}^T is the total failure rate.

C_{ij}^T, C_{ij}^{CM} are related costs to each subsystem j of type i .

The cost of STR is directly proportional to a cost of production loss due to a spurious shutdown (Torres-Echeverria, 2009):

$$C_{STR} = STR \cdot C_{SD} \quad (26)$$

where:

$$C_{SD} = SD_{TIME} \cdot SD_{LOSS} \quad (27)$$

The present value of the life cycle cost in our case is defined as follows:

$$LCC_{T\&CM} = (C_{T\&CM} + C_{STR}) PVF \quad (28)$$

where:

$$PVF(\text{present value factor}) = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \quad (29)$$

with,

r : interest rate;

n : number of periods representing the life cycle of the system.

For the future value:

$$LCC_{T\&CM} = (C_{T\&CM} + C_{STR}) FVF. \quad (30)$$

where

$$FVF(\text{future value factor}) = \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \quad (31)$$

Note that the cost of preventive maintenance corresponds to the cost of periodic testing according to the maintenance policy applied (Touahar, 2015).

4. Case study

4.1 Problem optimization:

To validate the proposed approach, it has been applied to an emergency shutdown system (ESD) of an operational blower section of the RGTE unit. In order to improve the performance of this ESD, by minimizing the PFD_{avg} , the STR and the $LCC_{T\&CM}$, two maintenance strategies have been developed:

Strategy 1: implement a test policy (T) without changing the architecture vote “ K ”.

Strategy 2: implement a test policy (T) with a change in architecture voting “ K ” of both sub systems sensors and logical unit.

Each proposed optimization strategy consists in resolving the problems of:

- (1) Multi-objective optimization of PFD_{moy}^{ESD} , STR_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$, without any constraints;
- (2) Multi-objective optimization of PFD_{moy}^{ESD} , STR_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$;

Under constraints: $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ and $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$.

Let's note down that:

- (1) The components of ESD subsystems are not identical and repairable;
- (2) The components of the ESD subsystems are distributed over several pieces of equipment (complex architecture);
- (3) Each ESD subsystem has its own test interval;
- (4) The components of each subsystem are tested at the same time.

4.2 Description of ESD system of the blower section:

As mentioned before, we have chosen an operational SIS installed in the blower section of the RGTE (flaring gas revering unit, Edjelet field). The purpose of the RGTE unit, commissioned in March 2005, is to recover, compress, dehydrate and transport the gas usually flared (flared in flares) at the ten (10) crude oil separation centers of the field.

The recovered gas will be used to provide gas lift injected into oil wells that require activation (by gas lift) in order to increase crude oil production and to achieve stable well flow.

The ESD system installed in the blower section is operating in low demand which ensure in case of its activation, the total shut down of the RGTE (Blower and compressor section) to minimize the risk of consecutive damage.

All the ESD system components of the blower section are grouped together in [Figure 7](#) and in [Table 1](#) with the presentation of their architecture (type $K00N$) as well as the definition of their functions in the process.

The required data to optimize the ESD performances of the blower section are given in the following [Table 2](#).

4.3 SIS multi-objective optimization by genetic algorithms:

Among multi-objective optimization techniques, Genetic Algorithms (GA) are widely and successfully applied to complex optimization problems due to their robustness and customization. Indeed, compared to other optimization methods such as heuristic methods and non-linear programming methods are very complex in terms of computation and are only mentioned in single-objective optimization applications ([Sallak et al., 2008](#); [Deb, 2001](#); [Zidani, 2013](#)). The complexity of implementing these methods for multi-objective optimization may be excessive.

Due to their inherent parallelism, genetic algorithms (GA) have the potential to find several Pareto -optimal solutions in a single simulation. This meta-heuristic method is based on the evolutionary principle of survival of the fittest. They are part of artificial intelligence techniques that mimic the process of natural selection and evolution towards a set of optimal solutions, based on stochastic search techniques.

Generally the problem of modeling and optimization by GA is based upon two main characteristics ([Otsmani et al., 2011](#)):

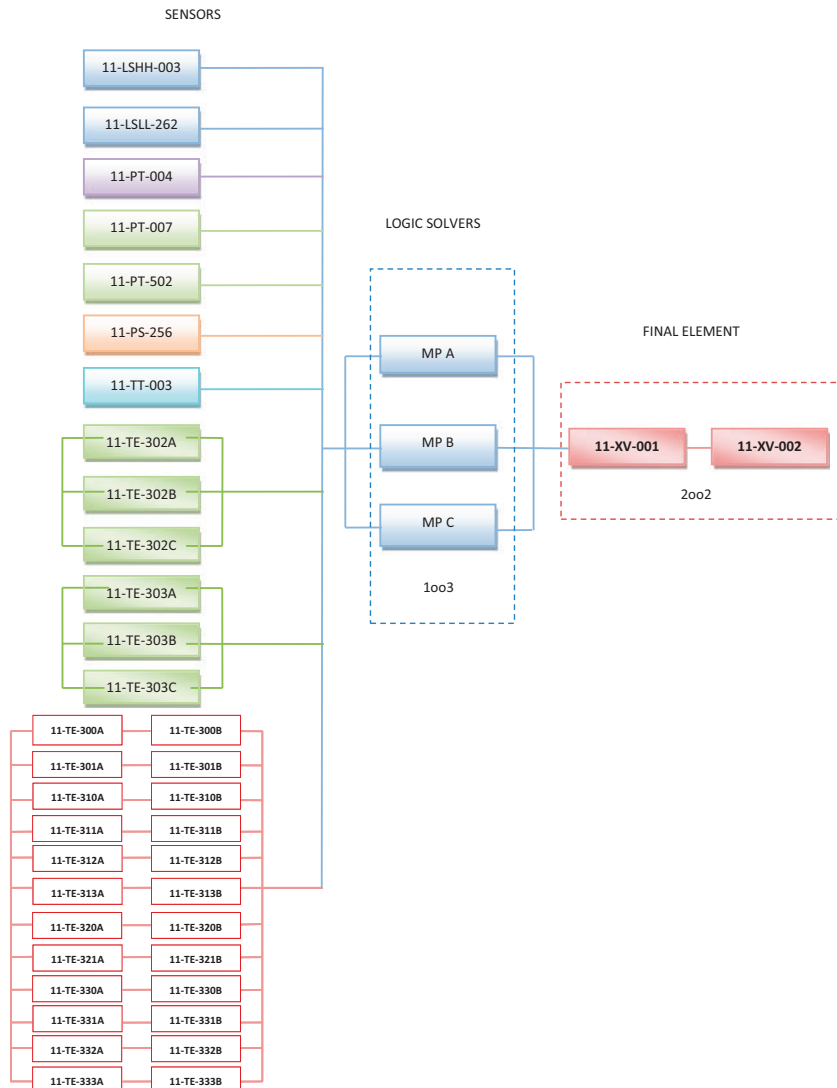


Figure 7.
ESD Architecture of
the Blower section

- (1) Definition of a genotype corresponds to the structure that represents the coding of a solutions chain.
- (2) Optimization of an objective function, which assesses an individual's solution.

The execution of GA for resolving of our problem consists in developing the different steps according to the following process (Figure 8):

In order to facilitate the use of genetic algorithms, their execution is now fully supported by the "Optimization Toolbox" tool in MATLAB.

4.3.1 Implementation of genetic algorithms. The components of ESD are represented by a T_i vector (chromosome) of (03) genes for the first strategy where each gene represents the

No	Element	Designation	Type	Architecture	Function
1	11-LSHH003	L1	Float level switch	1001	Detects the liquid level of the separation balloon 11-B-001
2	11-LSLL-262	L2	Float level switch	1001	Detects the level of sealing oil in the tank
3	11-PT-004	P1	Differential pressure transmitter	1001	Detects the suction pressure upstream of the blower 11-K-001
4	11-PT-007	P2	Pressure transmitter	1001	Detects blower discharge pressure
5	11-PT-502	P3	Pressure transmitter	1001	Detects instrument air pressure
6	11-FS-256	P4	Pressure Switch	1001	Detects the lubrication oil pressure
7	11-TT-003	T1	Resistance temperature transmitter	1001	Detects the discharge temperature downstream of the blower 11-K-001
8	11-TE-302A	T2	Temperature detector	1003 A, B, C	Detect the discharge temperature downstream of the blower 11-K-001
9	11-TE-302B	T3			
10	11-TE-302C	T4			
11	11-TE-303A	T5	Temperature detector	1003 A, B, C	Detect motor winding temperature 11-KM-001
12	11-TE-303B	T6			
13	11-TE-303C	T7			
14	11-TE-300A	T8	Resistance temperature sensors	2002 A, B	Detect the temperature of the blower bearing 11-K-001
15	11-TE-300B	T9			
16	11-TE-301A	T10		2002 A, B	
17	11-TE-301B	T11		2002 A, B	
18	11-TE-310A	T12		2002 A, B	
19	11-TE-310B	T13		2002 A, B	
20	11-TE-311A	T14		2002 A, B	
21	11-TE-311B	T15		2002 A, B	
22	11-TE-312A	T16		2002 A, B	
23	11-TE-3128	T17		2002 A, B	
24	11-TE-313A	T18		2002 A, B	
25	11-TE-313B	T19		2002 A, B	
26	11-TE-320A	T20		2002 A, B	
27	11-TE-320B	T21		2002 A, B	
28	11-TE-321A	T22		2002 A, B	
29	11-TE-321B	T23		2002 A, B	
30	11-TE-330A	T24		2002 A, B	
31	11-TE-330B	T25		2002 A, B	
32	11-TE-331A	T26		2002 A, B	
33	11-TE-331B	T27		2002 A, B	
34	11-TE-332A	T28		2002 A, B	
35	11-TE-332B	T29		2002 A, B	
36	11-TE-333A	T30		2002 A, B	
37	11-TE-333B	T31		2002 A, B	
38	MP1	MP1	Treatment modules	1003 A, B, C	Collect information from the detection part, carry out the decision-making process and transmit it to the actuators
39	MP2	MP2			
40	MP3	MP3			
41	11-XV-001	V1	Suction isolation valve	1001	Close to stop the gas from entering the blower section
42	11-XV-002	V2	Discharge isolation valve	1001	Close to stop the return of gas at the outlet of the blower section

Table 1.
ESD system
components
characteristics

Table 2.
The data related to components of ESD subsystems of the blower section (Touahar, 2015)

Sub systems Data	ESD system sensors							
	Pressure switch	Pressure transmitter	Float level switch	Temperature Transmitter (Detector)	Logic Unit (PLC)	Shut Down Valve (SDV)	Pressure transmitter	Pressure switch
$\lambda(E-6/h)$	3.4		3	2	17.6	5.4		
$\lambda_D(E-6/h)$	2.3	1.3	1.4	0.7	8.8	2.7		
D_{CD}	0.15	0.8	0.6	0.6	6.00E-01	2.50E-01		
$\lambda_S(E-6/h)$	1.1	0.6	1.60E+00	1.3	8.80E+00	2.7		
D_{CS}	0.1	0.5	3.00E-01	0.3	2.00E-01	0.00E+00		
β_D		3.00E-01						
B_S	0.1	0.1	0.1	0.1	1.00E-02	1.00E-01		
MTTR (hour)	8	8	8	8	0.01	0.1		
$C_T(\$/Equipment)$	90				8	108		
$C_{CM}(\$/Equipment)$	480				216	16,264		
$T_1(H)$			4,380		27,077	4,380		
			8760		4,380	8760		
			13,140		13,140	13,140		
			17,520		17,520	17,520		
C_{STR}								

$SD_{TIME} = 24$ h
 $SIS_{LIFE} = 15$ years
 Loss of production = 10,306 \$/h; $R = 0.05$

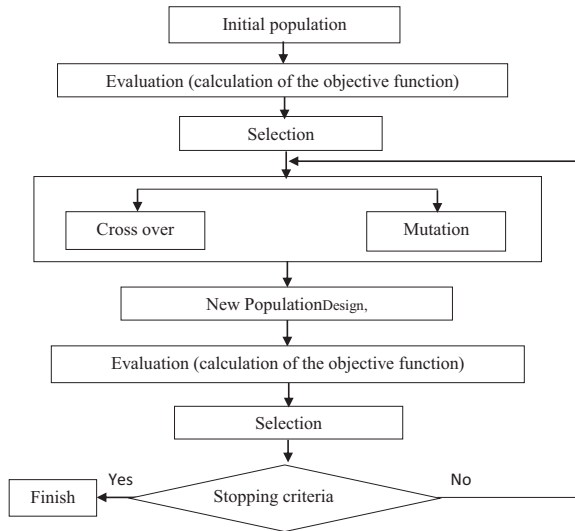


Figure 8.
Flowchart of a genetic
algorithm
(Bendine, 2016)

period test of each ESD subsystem, for the second one the chromosome is composed of (05) genes where the first three represent the period test of each subsystem and the last two represent the architecture voting variation K of temperature sensors and logic solver. Figures 9 and 10 provide respectively the coding of the two mentioned strategies to be optimized.

First strategy: This first strategy is to implement a test policy (T) without changing the “architecture voting” “ K ”;

- (1) *First case:* Multi-objective optimization of PFD_{moy}^{ESD} , STR_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ without any constraint.

This kind of optimization problem consists in simultaneous minimization of different objectives PFD_{moy}^{ESD} , STR_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$. Equations (9), (14) and (28) are respectively used for the quantification of these objectives.

- (1) *Second case:* Multi-objective optimization of STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ under constraints $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ and $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$.

For this optimization problem, we consider the two constraints of periodic test costs and corrective maintenance costs, estimated by a judgment of experts (Touahar, 2015):

$$C_T^{MAX} = 8288.712\$/\text{year}, \text{ and } C_{CM}^{MAX} = 33,154.848\$/\text{year}$$

The obtained solutions for both cases are presented in Table 3.

X1	X2	X3
T1	T2	T3
(SENSORS)	(UL)	(SDV)

Figure 9.
Coding of the first
optimization strategy

X1	X2	X3	X4	X5
T1	T2	T3	K1	K2
(SENSORS)	(UL)	(SDV)	(TT SENSORS)	(UL)

Figure 10.
Coding of the second
optimization strategy

The solutions distribution of the first strategy both cases is illustrated in Figure 11 below. *Second strategy:* we have proceeded in this strategy to change the architecture voting K of sensors and logical unit.

- (1) *First case:* multi-objective optimization of PFD_{avg} , STR and $LCC_{T\&CM}$ without any constraint

The second coding is used in this strategy, it should be noted that the configuration change affected only the discharge temperature sensors downstream of the 11-K-001 blower, and the 11-KM-001 motor winding sensors (11-TE-302A, 11-TE-302B, 11-TE-302C, 11-TE-303A, 11-TE-303B and 11-TE-303C) having architecture of (1oo3). The justification for such a choice is that these sensors are redundant and detect at the same point for each equipment, hence, root cause causes of spurious shutdowns (Rudall Blanchard Associates, 2005).

- (1) *Second case:* Multi-objective optimization of STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ under constraints $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ and $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$.

The obtained solutions for both cases are shown in Table 4.

The solutions distribution of the second strategy both cases is illustrated in Figure 12 below.

4.3.2 Discussion of the obtained results. According to the obtained results (Table 3) of the first strategy, we note that solutions [1 1 1], [3 3 1], [2 1 1] and [3 2 1] for the first and second case respectively, allow an improvement of SIS performances by minimizing STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ of 15 years.

Concerning the second strategy, it appears that solutions [1 1 1 2 2] and [2 1 1 2 2] for the first and second cases respectively, allow a significant improvement of SIS performances by ensure simultaneous minimization of STR_{moy}^{ESD} , PFD_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ of 15 years.

Furthermore, a comparison of the two strategies shows that the solutions [1 1 1 2 2] and [2 1 1 2 2] can be recommended. Indeed, the change in voting of the downstream discharge temperature detector subsystem (11-TE-302A, 11-TE-302B, 11-TE-302C, 11-TE-303A, 11-TE-303B and 11-TE-303C) and of the Logic Solver subsystem, by changing the architecture from 1oo3 to 2oo3, allowed a significant improvement in the performance of the SIS and a considerable reduction in LCC to 1,511.10⁶ US dollars.

Finally, a detailed analysis of these results shows that the recommended optimal strategy for improving the performance of the studied SIS is [2 1 1 2 2]. This strategy is obtained by acting on the test frequency of the various SIS subsystems and changing of architecture voting of both sensors and logic solver subsystems.

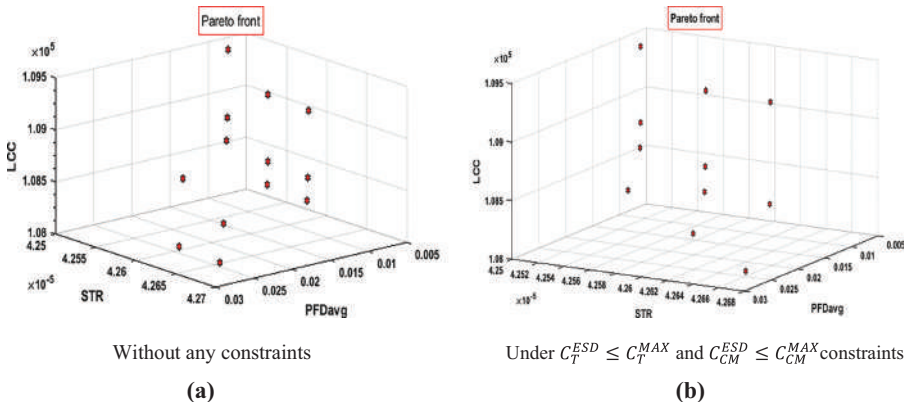


Figure 11.
Comparison of the
pareto front for the two
cases: first strategy

Table 4.
Optimal Pareto
solutions of the second
strategy

Variables		Multi objective optimization of $STR_{\text{avg}}^{\text{ESD}}$, $PFD_{\text{avg}}^{\text{ESD}}$ and $LCC_{7\&CM}$					Objective functions		
$T1_{(\text{SENSORS})}$	$T1_{(\text{UL})}$	$T1_{(\text{SDV})}$	$K1_{(\text{SENSORS})}$	$K2_{(\text{UL})}$	PFD_{avg}	STR	$LCC_{7\&CM}$	PV $LCC_{7\&CM}$	FV $LCC_{7\&CM}$
<i>(1) Without constraints</i>									
2	1	2	2	2	0.0172092	1.03E-05	38974.3407	404540.329	841010.29
2	2	1	2	1	0.0086292	3.56E-05	93379.4253	969246.503	2014993.87
1	1	3	2	2	0.02563523	1.02E-05	39201.6901	406900.137	845916.162
2	1	1	2	1	0.00854578	3.56E-05	94027.4253	975972.521	2028976.78
1	1	1	2	2	0.00878318	1.02E-05	39377.6116	408726.143	849712.296
1	1	1	2	1	0.00854578	3.55E-05	94270.7354	978497.997	2034227.06
2	1	3	2	2	0.02563523	1.03E-05	38958.38	404374.662	840665.879
2	3	1	2	1	0.00872337	3.56E-05	93163.4253	967004.497	2010332.9
1	3	1	2	1	0.00872337	3.55E-05	93406.7354	969529.972	2015583.18
1	2	1	2	1	0.0086292	3.55E-05	93622.7354	971771.978	2020244.15
2	1	1	2	2	0.00878318	1.03E-05	39134.3015	406200.667	844462.014
<i>(2) Under $C_{T}^{\text{ESD}} \leq C_{T}^{\text{MAX}}$ and $C_{\text{GM}}^{\text{ESD}} \leq C_{\text{GM}}^{\text{MAX}}$ constraints</i>									
2	3	1	2	1	0.00872337	3.56E-05	93163.4253	967004.497	2010332.9
1	1	1	2	2	0.00878318	1.02E-05	39377.6116	408726.143	849712.296
2	1	1	2	1	0.00854578	3.56E-05	94027.4253	975972.521	2028976.78
2	2	1	2	2	0.0086292	3.56E-05	93379.4253	969246.503	2014993.87
1	1	1	2	1	0.00854578	3.55E-05	94270.7354	978497.997	2034227.06
2	1	2	2	2	0.0172092	1.03E-05	38974.3407	404540.329	841010.29
2	1	3	2	2	0.02563523	1.03E-05	38958.38	404374.662	840665.879
1	2	1	2	1	0.0086292	3.55E-05	93622.7354	971771.978	2020244.15
1	3	1	2	1	0.00872337	3.55E-05	93406.7354	969529.972	2015583.18
2	1	1	2	2	0.00878318	1.03E-05	39134.3015	406200.667	844462.014
1	1	2	2	2	0.0172092	1.02E-05	39217.6508	407065.805	846280.572

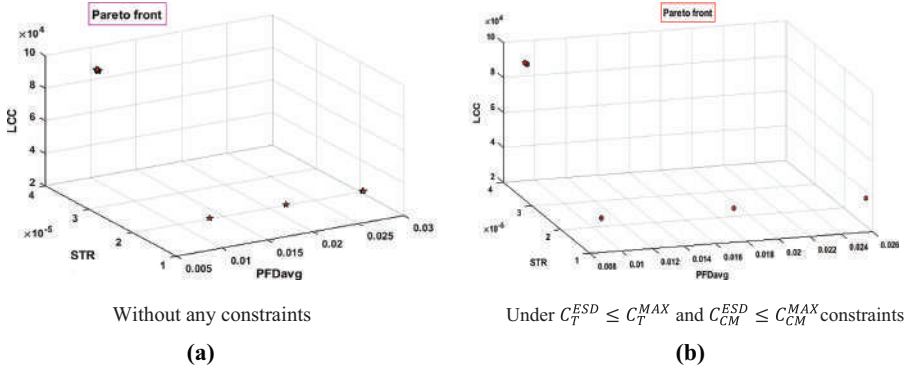


Figure 12.
Comparison of the
pareto front for the two
cases: second strategy

5. Conclusion

The objective of this work is to propose a multi-objective optimization approach of SIS performances in its operational phase by minimizing the $PF D_{moy}^{ESD}$, STR_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ under maintenance costs constraint. For this purpose and in order to establish a compromise between these performance indicators, by ensuring a significant improvement in system safety and availability, we have developed and assessed two maintenance strategies by implementing a test policy (T) with and without the change of architecture voting K of specific sensors and for the logic unit.

Each proposed optimization strategy consists of solving these problems:

- (1) Multi-objective optimization of $PF D_{moy}^{ESD}$, STR_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ without any constraint.
- (2) Multi-objective optimization of $PF D_{moy}^{ESD}$, STR_{moy}^{ESD} and $LCC_{T\&CM}$ under $C_T^{ESD} \leq C_T^{MAX}$ and $C_{CM}^{ESD} \leq C_{CM}^{MAX}$ constraints.

To enhance our approach, it was applied to an operational ESD system implemented on the RGTE blower section unit by using genetic algorithms under the “Optimization Toolbox” of MATLAB.

The obtained results show that both testing policy and architecture voting of SIS sensors sub-system and logical unit have an important effect on SIS performance indicators.

Furthermore, after the effected comparison study of the obtained solutions, we recommend the use of the following strategy:

- (1) Perform sensors test every 18 months;
- (2) Perform Logic Solver and Final Elements tests every 6 months;
- (3) Change the architecture of Sensors and Logic Solver from 1003 to 2003.

The proposed approach presents several advantages:

It shows that the maintenance strategy defined by the system designer can be modified and improved during the operational phase. For example, in the case of SIS spurious activations that were not known or taken into consideration by industrialists before 2008 (Lundeigen and Rausand, 2008; Torres-Echeverria, 2009);

- (1) It constitutes one of the least expensive investment strategies for improving SIS performances. It has allowed a considerable minimization of the SIS life cycle costs;

- (2) It constitutes a decision-making tool for RGTE site managers and contributes in managing the continuous improvement of the facility performance;
- (3) Inviting Algerian legislators to require from manufacturers to bring the ageing facilities into compliance, particularly those presenting major risks, by developing maintenance strategies that take into consideration spurious trips.

References

- Belhou, L. (2015), "Solving problems of combinatorial mono and multi-objective optimization by ordered enumeration", Doctoral thesis in computer science, Dauphine University, Paris, available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127114>.
- Bendine, K. (2016), "Contribution to the study of active control of composite structures by incorporating intelligent materials", doctoral thesis, DjillaliLiabes University, SidiBel Abbas.
- Bram, D.J. and Philip, A.S. (2019), "A review on maintenance optimization", *European Journal of Operational Research*, Vol. 285 No. 3, pp. 805-824.
- Brissaud, F., Vinuesa, C. and Folleau, C. (2018), "Optimising proof test policy of redundant safety-related systems", *21st Congress on Risk Management and Dependability λμ21 Reims*, October 16-18, 2018, France.
- Deb, K. (2001), *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Wiley, Chichester.
- Dong, Y.L., GU, Y.J. and Dong, X.F. (2008), "Selection of optimum maintenance strategy for power plant equipment based on evidential reasoning and FMEA", *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 8-11 Dec. 2008, Singapore.
- Emerson Delta V SIS (2018), *Functional Safety in Practice*, White paper, Endress Hauser GmbH+Co. KG, Maulburg.
- Gan, R., Guo, Y., Jinhua, Z. and JuanandShengxiang, Z.Y. (2017), "The effect of diversity maintenance on prediction in dynamic multi-objective optimization", *Applied Soft Computing*, Vol. 58, pp. 631-647.
- Gueret, C., Prins, C. and Sevaux, M. (2000), *Linear Programming - 65 Optimization Problems Modeled and Solved with Visual Xpress*, EYROLLES, Paris.
- HSE (2008), "Guidance on as low as reasonably practicable (ALARP) decisions in control of major accident hazards", available at: www.hse.gov.uk/comah/circular/perm12.htm (accessed 10 June 2008).
- Iddir (2009), *Évaluation de la Probabilité de Défaillance D'Un Système Instrumenté de Sécurité (SIS)*, Techniques de l'Ingénieur, Doc. SE 4 058- 1, 249 rue de Crimée - 75019 - Paris.
- IEC 61508 (2010), *Functional Safety of Electrical/electronic/programmable Electronic Safety Related Systems*, 2nd ed., IEC 61508 Standard, Geneva, Parts 1-6.
- IEC 61511 (2016), *Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector*, 2nd ed., International Standard, Geneva.
- Innal, F., Dutuit, Y. and Chebila, M. (2015), "Safety and operational integrity evaluation and design optimization of safety instrumented systems", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 134, pp. 32-50.
- Keller, A.A. (2018), *Mathematical Optimization Terminology: A Comprehensive Glossary of Terms*, 1st ed., Elsevier, Academic Press, Cambridge, Massachusetts, available at: http://store.elsevier.com/Academic-Press/IMP_5.
- Lundteigen, M.A. and Rausand, M. (2008), "Spurious Activation of safety instrumented systems in the oil and gas industry: basic concepts and formulas", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 93, pp. 1208-1217.

-
- Lydersen, S. and Aaro, R. (1989), "Life cycle cost prediction", *Handbook: Computer-Based Process Safety Systems*, SINTEF reports STF75 A89024, Trondheim.
- Macheri, W. (2011), "Performance evaluation of safety instrumented system to imprecise parameters", doctoral thesis, National School of Engineers, University of Tunis.
- Otsmani, Z., Khiat, M. and Chaker, A. (2011), "Minimization of the periodic preventive maintenance cost of a serial-parallel system by the genetic algorithm", *ACTA Electrotehnica*, Vol. 52, Mediamira science publisher, pp. 74-80.
- Ouazraoui, N. and Nait Said, R. (2019), "An alternative approach to safety integrity level determination: results from a case study", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 36 No. 10, pp. 1784-1803.
- Redutskiy, Y. (2017), "Optimization of safety instrumented system design and maintenance frequency for oil and gas industry processes", *Management and Production Engineering Review*, Vol. 8 No. 1, pp. 46-59.
- Riauque, J. and Bartlett, L.M. (2008), "An offshore safety system optimization using an SPEA2-based approach", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, Vol. 222, pp. 271-282.
- Rudall Blanchard Associates (VER: 1) (2005), *Hazard Study of RGTE ProjeReport*, Sonatrach DP In Amenas.
- Salazar, D., Rocco, C.M. and Galvan, B.J. (2006), "Optimization of constrained multiple-objective reliability problems using evolutionary algorithms", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91 No. 9, pp. 1057-1070.
- Sallak, M., Christophe Simon, C. and Aubry, J.F. (2008), "Optimal design of safety instrumented systems: an approach using reliability block diagrams", *7th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation of Systems, MOSIM 08*, Mar 2008, Paris, France, hal-00280670.
- Sarker, R.A. and Newton, C.S. (2008), *Optimization Modeling: A Practical Approach*, CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, Florida.
- Sharma, A. and Mukherjee, I. (2019), "Enhanced multi-objective solution approach for multiple quality characteristics optimisation problems considering predictive uncertainties", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 37 No. 1, pp. 112-144.
- Silvana, D.C., SasantiMusyafa, G.F.A., Soeprijanto, A. and Biyanto, T.R. (2018), "Duelist algorithm for optimisation of safety instrumented system at distillation column based on RAMS + C", *Safety and Reliability*, Vol. 37 Nos 2-3, pp. 1-17.
- SINTEF (2006), "Reliability data for safety instrumented systems", 2006 edition, *PDS Data handbook*.
- Sukhwinder, S.J. and Bikram, J.S. (2014), "An approach to enhance availability of repairable systems: a case study of SPMs", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 31 No. 9, pp. 1031-1051.
- Sung Kyu, K. and Yong Soo, K. (2013), "Evaluation process for the hardware safety integrity level", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 7 No. 4, pp. 547-551, available at: scholar.waset.org/1999.8/5621.
- Torres-Echeverria, A.C. (2009), "Modeling and optimization of safety instrumented systems based on dependability and cost measures", PhD thesis, The University of Sheffield.
- Torres-Echeverria, A.C., Martorell, S. and Thompson, H.A. (2009a), "Modeling and optimization of proof testing policies for safety instrumented systems", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94 No. 4, pp. 838-854.
- Torres-Echeverria, A.C., Martorell, S. and Thompson, H.A. (2009b), "Design optimization of a safety instrumented system based on RAMS+C addressing IEC 61508 requirements and diverse redundancy", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94 No. 2, pp. 162-179.

-
- Torres-Echeverria, A.C., Martorell, S. and Thompson, H.A. (2011), "Modeling safety instrumented systems with MooN voting architectures addressing system reconfiguration for testing", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 96, pp. 545-563.
- Torres-Echeverria, A.C., Martorell, S. and Thompson, H.A. (2012), "Multi-objective optimization of design and testing of safety instrumented systems with MooN voting architectures using a genetic algorithm", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 106 No. 2012, pp. 45-60.
- Touahar, H. (2015), "Maintenance of instrumented security systems (SIS): case study", Master thesis, HADJ-LAKHDAR University, Batna, p. 89.
- Umamaheswari, E., Ganesan, S., Abirami, M. and Subramanian, S. (2018), "Reliability/risk centered cost effective preventive maintenance planning of generating units", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 35 No. 9, pp. 2052-2079.
- Wang, H., Wang, W. and Peng, R. (2017), "A two-phase inspection model for a single component system with three-stage degradation", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 158, pp. 31-40.
- Yang, L., Zhao, Y. and Ma, X. (2018), "Multi-level maintenance strategy of deteriorating systems subject to two-stage inspection", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 118, pp. 160-169.
- Zidani, H. (2013), "Representation of a solution in continuous optimization, multi-objective and applications", joint supervision doctoral thesis, INSA of Rouen; Mohammed V-Agdal University, (Rabat, Morocco), 2013.French. NNT: 2013ISAM0027.
- Zitzler, E. (1999), "Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: methods and applications", Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich.

Corresponding author

Nouara Ouazraoui can be contacted at: ouzraoui@yahoo.fr



Kasdi Merbah University-Ouargla
Faculty of New Technologies of Information and Communication
Department of Computer Science & Laboratory of Artificial Intelligence
and Information Technology



2nd International Conference on Artificial Intelligence and Information Technology « ICA2IT'19 »

Certificate of Participation

The Organizing Committee of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Information
Technology (ICA2IT) is pleased to certify that:

Hafed Touahar (Mostafa Ben Boulaïd University, Batna)

*Has attended the ICA2IT'2019 conference held at the University of Kasdi Merbah Ouargla, Algeria
from March 04th to March 06th, 2019 and has presented an oral presentation entitled:*

Spurious Trip Rate Modelisation and Quantitative assessment of Emergency ShutDown system in the oil and gaz industry

Authors: Hafed Touahar, Nouara Ouazraoui, Mourad Korichi, Rachid Nait Said and Bilal Bachi

ICAIT '2019 Chair



Ouargla, March 6th, 2019

Spurious Trip Rate Modelisation and Quantitative assessment of Emergency ShutDown system in the oil and gaz industry

Abstract

The main purpose of Safety-related implementation systems is to maintain safety condition of a plant or equipment from the hazardous events, but even if no indications of impairment are present, the instrumented safety system is spuriously tripped. These activations are characterized in terms of frequency by spurious trip rate and their occurrence can lead to significant technical and economic losses.

The identification of these trips, their causes, their effects and their evaluations have been the subject of several research studies. Hence, the aim of this work is to offer an analysis and risk modelling of T to SIS installed in an operational industrial installation of Edjelet gas flares recovery project located in In Amens W-ILLIZI Algeria, by a risk analysis tool, the fault-tree analysis method and the STR estimation according to different approaches are drawn from literature.

Keywords— *Safety instrumented systems, Spurious activation, Spurious trip rate, Fault tree Analysis.*

I. Introduction

Industrial plants are technically becoming very complex and if dangers are not properly controlled the potential hazard will be increasing accordingly. In this view, management of risk will require implementation of risk control commonly referred to as safety gates, Such as Safety Instrumented System (SIS). They are implemented in order to ensure operating safety of installations i.e. reducing risks to level below or equal to a tolerable risk.

The activation of SIS in industrial processes is carried out after the occurrence of specific impairment (dangerous situations) compared to normal operation (normal situations), but in some cases SIS are activated in the absence of deviations or demands: it is spurious activation.

Indeed, the unpredictability of these activations makes them critical. The functional analysis and feedback related to ST has shown that their occurrence lead to significant techno-economic losses (loss of production, maintenance costs, cost of restarting the Process, decreasing the SIS confidence level, Clients complaints, etc). Consequently, the identification of these activations, their causes, their effects and their assessment is essential.

The quantitative assessment of these activations is used for calculating the Spurious Trip Rate (STR). According to different approaches, several analytical formulas related to the estimation of STR are developed in this literature.

Company owners think that it is undeniable to minimize this type of trip as much as possible. The analysis and the quantitative assessment of these risks will provide a useful tool in the decision-

making for improving the performance of SIS, hence the main target of this work.

To achieve this objective, our article is organized as follows, the first section is the introductory part, and the second defines the SIS highlighting its failures namely, the spurious activations. Concerning the third section, it talks about examinations and comparisons of different approaches, providing the analytical formulations of Spurious trip rate. The fourth section is dedicated to the presentation of our approach and the last section to its application on SIS installed in an operational industrial installation RGTE (Gas Flares recovery of the field of Edjelet In AmenLLIZI Algeria).

II. Instrumented Security Systems and Spurious Trip

IEC 61508 [12] defines systems for safety applications by "an E / E / EP system (electrical / electronic / programmable electronics) that includes all system components necessary to fulfil the safety function".

IEC 61511 [13] defines instrumented safety systems as "an instrumented system used to implement one or more instrumented safety functions (SIFs)". SIS includes any combination of (Fig.1):

Subsystem S (Sensor): it comprises a set of input elements (sensors, detectors) that monitors the physico-chemical parameters evolution typical of the process behaviour (temperature, pressure, flow, level ...). This change is recognized by the relevant sensors which send a signal to the subsystem LS (Logic-Solver).

Subsystem LS: This subset of logical elements executes the decision-making process through the activation of the third FE (Final Element) subsystem.

FE: these elements act directly (emergency stop valves) or indirectly (solenoid valves) the drift on the process is neutralized and the system automatically shuts down (safe status) after a duration that must be specified for each security function.

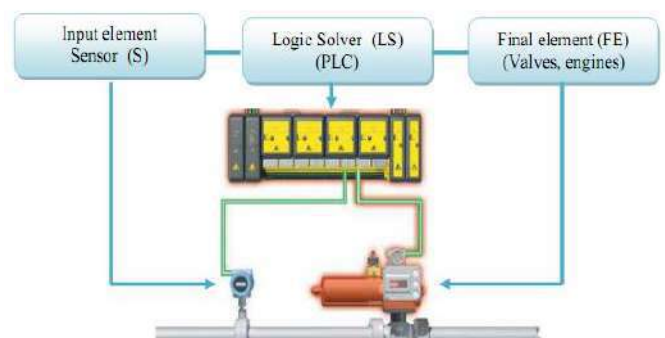


Fig. 1. SIS Example [12].

A safety instrumented function (SIF) is a function to be performed by SIS intended to ensure or maintain a state of safety of the relevant equipment (EUC: Equipment under Control) with respect to a specific hazardous event.

SIS can implement one or more SIFs. For a given situation, several safety functions may lead to a decrease in the occurrence frequency of the hazard.

The functional architecture of SIS is a set of SIFs comprising three basic features, detection (or measurement), processing (or decision), and operation.

A. Classification of SIS failures

IEC 61508 [12] standard adopts a classification comprising two faults categories: physical (random hardware) and functional (systematic) (Fig.2).

Random faults of the material described by the above standard is the following: "faults occurring randomly and resulting from various mechanisms of damage in the hardware":

- Aging equipment: Failures due to aging are called natural or primary failures.
- Excessive constraints: these constraints can be induced by external factors or by human errors these failures are called secondary failures.
- Systematic failure is defined by the same standard as a "deterministically related failure" that can only be eliminated by a change in the design or manufacturing process, operating procedures, documentation or other appropriate factors"
- Design failures: These failures are introduced during one of the phases of the system lifecycle. They are dormant, and revealed during the operation of the system and can generally be eliminated only by a modification of the design or manufacturing process. Typical examples of such failures are design defects in software and hardware.
- Interaction failures: these failures are caused by human errors during operation, maintenance ...

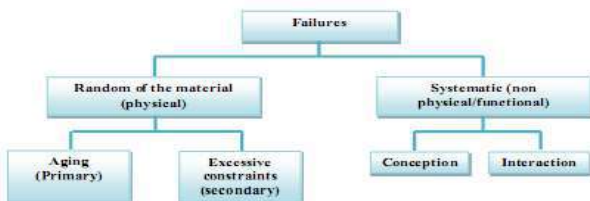


Fig. 2. Failures classification based on their causes [16].

All faults (random hardware and systematic), according to their effects, can be classified in one of two categories: (safe failures) or (dangerous failures) Fig 3

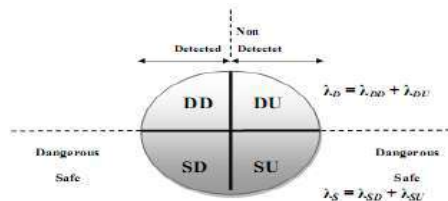


Fig. 3. Failures classification based on IEC 61508 [3].

As defined below, and according to SINTEF [17] agency, a more realistic classification than the previous one has been developed to include the spurious failures and non-critical failures as summarized by the tree indicated in Fig.4

At the component level SINTEF's PDS method considers, three types of failures: dangerous, spurious and non-critical.

From this classification, a classification of the failure rates summarized below has been developed [3]:

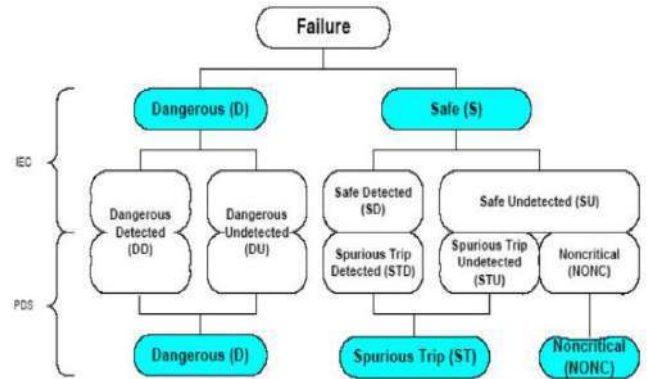


Fig.4 Faults Classifications according to SINEF (17)

- λ_{DD} and λ_{DU} are those defined by the standard.
- λ_{STD} is the failures trip rate detected. It corresponds to the λ_{SD} of the standard.
- The sum of ($\lambda_{STD} + \lambda_{NONC}$) corresponds to the λ_{SU} of the norm.
- The sum ($\lambda_D + \lambda_{STD} + \lambda_{STU}$) is called λ_{crit} .

Spurious failures are not even mentioned in the classification used by IEC 61508 standard, whereas the SINTEF classification considers these failures as a subclass of safe failures. The examples, often mentioned, of the spurious trip of an airbag or the inadvertent inversion of the thrust flow of a reactor in full flight are enough to show that this classification is more realistic [3]. .

B. SIS Spurious Trip

The first monothematic study dealing with the subject of spurious trips of SIS is that presented by Mr A. Lundteigen and Mr Rausand [8]. In this article, the authors use the collective term "spurious activation" which indicates that there is a certain transition from one state to another and the word "spurious" indicates that the trip causes are false, incorrect and non-real [8]. In an industrial process, spurious activations of SIS can cause partial or complete shutdowns of so it is necessary to reduce their number of appearances in order to:

- 1) Avoid production losses after shutdowns,
- (2) Avoid the risks that may appear during the restart phase.

According to reference [8], there are three different types of spurious activations of SIS which are (Fig.5):

• Spurious operation

Spurious operation (SO): is an activation of an element of a single SIS without a specific activation demand (real deviations). As if issuing an alarm from level transmitter without exceeding liquid level limit, because of the failure to distinguish from the foam the actual level of the liquid in a separator.

• Spurious trip

Spurious trip (ST): is an activation of one or more elements of SIS knowing that the SIF is performed in the absence of a specific activation demand process (real deviations). For example, two flame

detectors in a 2oo3 configuration (The system will react if at least 2 components out of the 3) give a false signal on the fire which causes the trips of the final elements and the activation of the safety instrumented function (SIF).

- **Spurious shut-down**

A spurious shut-down of the system can be partial or complete without any demand of an activation (actual deviations)

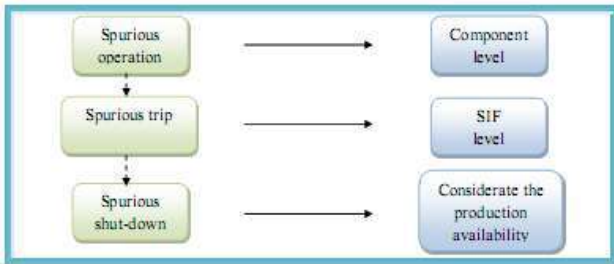


Fig.5. Different types of Spurious activations

According to Innal and al [3], the different types of spurious trips haven't been stimulated by a specific request process; This brings us to the idea that requests for SIS activations are of low demand. There is no justification for this restriction; only from the fact that the area of demand continues, and the associated PFH, have been less widely studied than that of low demand and its characteristic indicator PFH_{moy} .

The following definition is more comprehensive than the previous ones < a spurious failures can only be defined in association to a specified safety function; it either allows the activation without any previous demand, or annihilate this function after its successful activation. We can notice that the demand for requests in the first part of this definition is low but the second parts focus on continuous operation mode.

Another point to emphasize, is that the Spurious activation of SIS can be considered safe (perhaps temporarily), while it is dangerous. In other words, it again leads us to assert that spurious activations are not a subset of failures, or dangerous failures [3].

C. Causes of Spurious activations

Figure 6 illustrates the main causes of spurious activations represented in an influence diagram.

Spurious operation, spurious activation and spurious shut-down are described as performance knots (rounded rectangles) since their occurrence rate are performance issues to be minimized in order to reduce production losses [9].

Chance knots (Circles) are indicated as factors that have an impact on spurious activations rates. These factors are out of control, but we can indirectly impact their process by applying a set of decisions.

A decision can be by choosing an element with a reliability superior than specified. Another decision is to invest in training and in personnel competencies in order to reduce human errors during maintenance and operations activities. Irrelevant decisions are illustrated in figure 6 as decision knots (rectanglers). Arrows show the relations between decisions, impacting factors, and performance measures, dotted arrows in fig 6, to indicate that the link is established, under some conditions, as for any given material configuration.

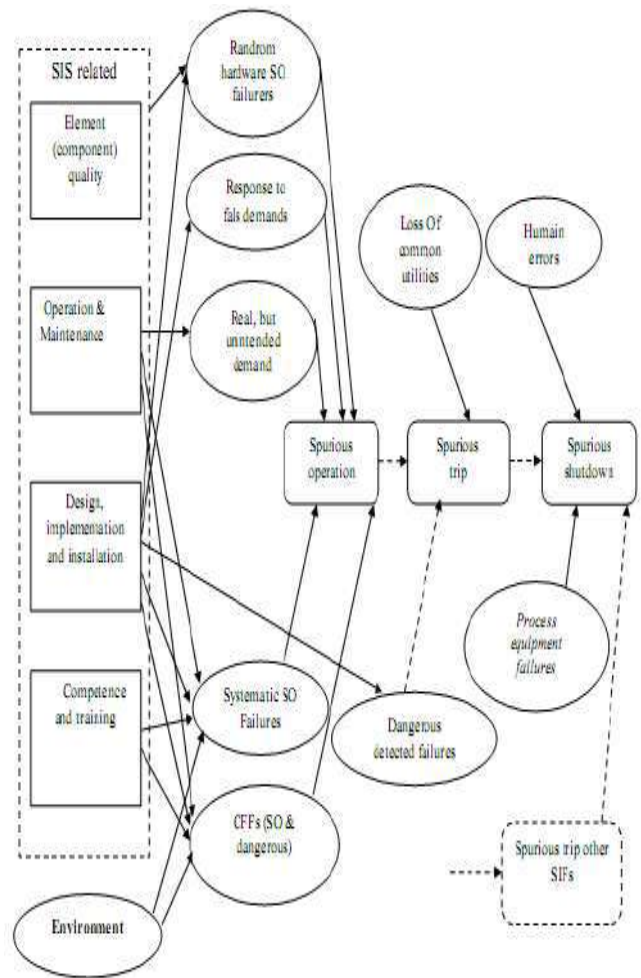


Fig. 6. Decisions and factors influencing spurious activation [8].

III. STR estimation approaches literature review

Let us first recall that the spurious trips rates STR is defined as the average number of spurious activations of the safety-instrumented function (SIF) by a unit of time [14].

This literature provides interesting works about analytic formulas related to spurious trips rates STR.

In general, for a $KooN$ architecture, $(N - K + 1)$ represents the number of dangerous failures whose occurrence induces the loss of the security function and K represents the number of spurious operations whose occurrence leads to the spurious activation of this same function.

The spurious trip rate (STR) of a well-defined safety function, provided by a given SIS, is determined by the calculation and combination of the STR of its three subsystems (S, LS and FE). This can be expressed by the following general formula

$$STR_{moy}^{SIS} = STR_{moy}^S + STR_{moy}^{LS} + STR_{moy}^{FE} \tag{1}$$

In Table 1, we presented a set of analytical formulas, involved with the estimation of the Spurious trip rate (STR) according to different approaches [2], [5], [6], [7], [8], [15], [16], [18]. The following section is devoted to the estimation of the STR of installed SIS in an operational industrial installation by implementing of the different formulas as well as by application of the fault tree method.

Architecture	Lundteigen/ Rausand)	ISA	SINTEF	Markov
1001	$\lambda_{SD} + \lambda_{DD}$	$\lambda_S + \lambda_{DD}$	λ_{SU}	$\lambda_{SU} + \lambda_{DD}$
1003	$(3 - 2\beta_{SD})\lambda_{SD} + \beta_{DD}\lambda_{DD}$	$3 \cdot [\lambda_S + \lambda_{DD}] + \beta(\lambda_S + \lambda_{DD})$	$3 \lambda_{SU}$	$3 \cdot [(1 - \beta_{SD})\lambda_{SD} + (1 - \beta_{SU})\lambda_{SU}] + \beta_{SD}\lambda_{SD} + \beta_{SU}\lambda_{SU}$
2002	$\beta_{SD}\lambda_{SD} + \beta_{DD}\lambda_{DD}$	$2\lambda_S[\lambda_S + \lambda_{DD}] + \beta(\lambda_S + \lambda_{DD}) + \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta(\lambda_S + \lambda_{DD})$	$\beta \lambda_{SU}$	$2(\lambda_{SD} + \lambda_{SU})[(1 - \beta_{SD})\lambda_{SD} + (1 - \beta_{SU})\lambda_{SU}] + 2 \cdot MTTR_{SD} + \lambda_S D_{CC}$

Tab.1. STR formulas of different approaches

IV. Case Study

In order to confirm our approach, which consists in modelling and quantifying the STR, we have chosen an operational SIS installed in a boosting section at the RGTE facilities of the Edjelet-In Amens W-ILLIZI Algeria field. The latter mainly comprises two (02) essential parts: a Boosting section and a compression section. The blower section has been chosen as a case study given its importance in this process of gas recovery (Fig.7). The gases recovered from the four (04) separation centres are collected by the buried low-pressure collection pipes and transported to the intake manifold of the blower section. Then the compressed gas is sent to the compression structure [10], [11].

In order to avoid any immediate loss of control of the blower section operations, with the possibility of endangering people's lives and damaging the equipment thus, anomalies should be immediately handled. This action is ensured by the activation of the emergency shut-down system (ESD).

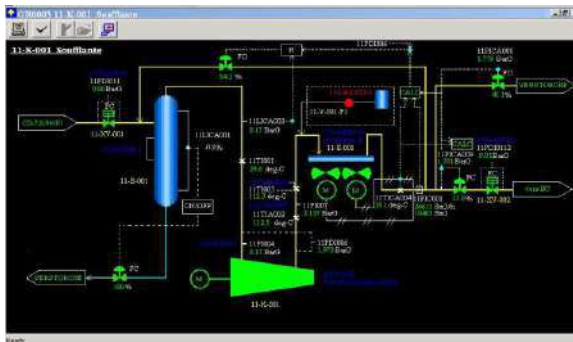


Fig.7. Blower Section.

The ESD system installed in the blower section is a low-demand SIS type that, when activated, provides automatic total RGTE shut-down (blower and compression sections) to minimize the risk of consequential damage. The ESD system comprises a set of input elements (transmitters, detectors) that monitor the evolution of physico-chemical parameters representative of the blowing section behaviour (temperature, pressure, level). If at least one of these parameters deviates beyond normal standards, and remains there, this deviation refers to demand or request. It is detected by the involved sensors which send a signal to the logic unit which is a programmable controller. The architecture of the logical drive is based on a redundancy called Triple-Modular Redundant (TMR). It includes three identical, parallel and isolated processing modules with diagnostic execution by a single card which, in case of deviation, gives the order to carry out the following actions:

Shut-down of 11-K-001;

- Closing of the suction isolation valve of 11-K-001: 11-XV-001

- Closing of the discharge isolation valve of the 11-K-001: 11-XV-002
- Opening the vent valve on the 11-K-001: 11-PV-008;
- Opening the anti-pumping valve of 11-K-001: 11-FV-001;

Figure 8 indicates the structure of the elements of the blower section system ESD.

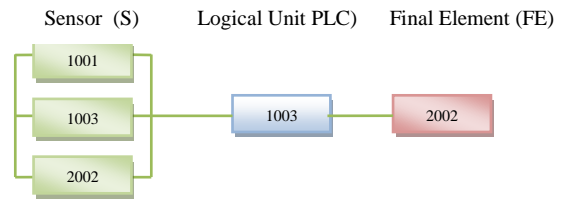


Fig.8. ESD system structure.

A. STR Modelling by FT

In order to determine the real causes (direct and indirect) of spurious trip of the blower section, the modelling of STs will be performed by the Failure Tree method (FT).

Fault Tree or "FT" is a graphical tool widely used in operating safety; it enables a graphic representation of possible combinations related to causes leading to predefined events. The FT is made up of successive levels of events revolving through logical gates. FT is a deductive method that can be used as a design assessment tool. Minimal cuts are recognized thanks to FT qualitative processing, which represent the smallest combinations of causes enabling the occurrence of the Undesirable event. Probability or frequency of occurrence of undesired events is calculated using quantitative treatment method [18].

System Spurious Trip (SST) of blower section is considered as critical or undesirable event of the FT (Fig.9). It is worth noting that common cause failures are taken into consideration during modelling. Development and processing of FT is performed by GRIF software.

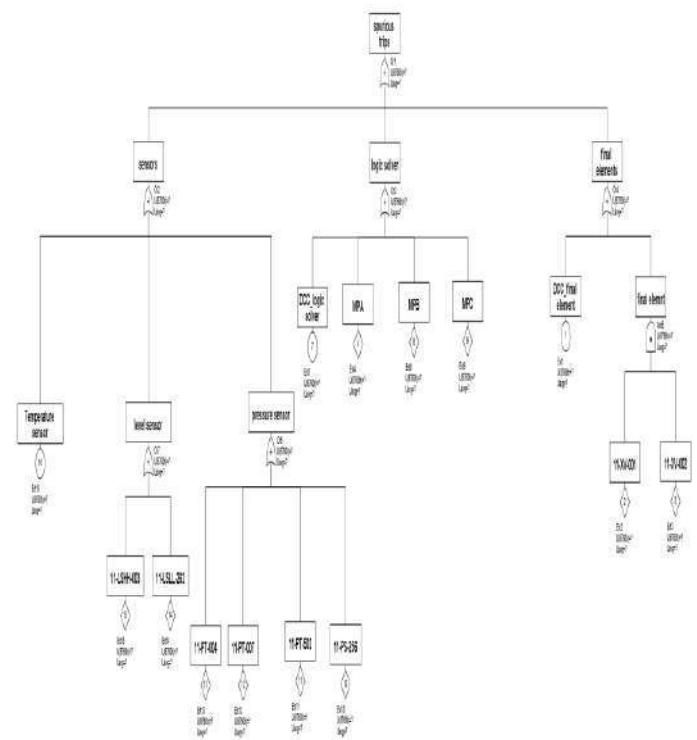


Fig.9. STR Modelling by FT

The Boolean expression of undesirable event is obtained as follows:

$$S = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 S = ST \text{ (Spurious Trip)} \\
 &= MP1 + MP2 + MP3 + (V1 \times V2) + L1 + L2 + P1 + P2 + P3 + P4 + T1 + T2 + T3 + T4 + T5 + T6 + T7 + (T8 \times T9) \\
 &+ (T10 \times T11) + (T12 \times T13) + (T14 \times T15) + (T16 \times T17) + (T18 \times T19) + (T20 \times T21) + (T22 \times T23) + (T24 \times T25) \\
 &+ (T26 \times T27) + (T28 \times T29) + (T30 \times T31) + DC \quad (3)
 \end{aligned}$$

The qualitative treatment of FT enables to show a minimum of 33

cuts:

- 17 cuts of type 1
- 13 cuts of type 2.

As first interpretation of these results, we conclude that Spurious trip occurrence is caused by logical units and sensors failures of temperature in particular. The number of minimal cuts indicates the weakness of studied SIS, which allows spurious trip or undesirable event occurrence.

Quantification of STR by FT

According to the third part of technical report of ISA-TR 84.00.02 [4], spurious trip rate estimation is different from that of Probability Failure on Demand (PFD), whereas STR is a frequency. For the gate 'OR' two basic events of STR is the sum of STRs for each component, and for the 'ET' gate, the STR is mathematically calculated as two basic events shown herein:

$$\begin{aligned}
 STR = & \text{Probability of component 1 failing} \times \text{Frequency of} \\
 & \text{Component failing 2} + \text{Probability of Component 2 failing} \\
 & \times \text{Frequency of Component 1 Failing} \quad (4)
 \end{aligned}$$

The probability of occurrence of the undesirable element is:

$$P(S) = P[C_1 + C_2 + \dots + C_n] = P[\sum_{i=1}^n C_i] \quad (5)$$

The data used to evaluate the STR of Emergency System Shutdown (ESD) for the blower section is taken from PDS Data Handbook, Edition 2006 [18].

$$\begin{aligned}
 P(S) = P(ST) = STR \\
 &= P(MP1 + MP2 + MP3 + (V1 \times V2) + L1 + L2 + P1 + P2 + P3 + P4 + T1 + T2 + T3 + T4 + T5 + T6 + T7 + (T8 \times T9) \\
 &+ (T10 \times T11) + (T12 \times T13) + (T14 \times T15) + (T16 \times T17) + (T18 \times T19) + (T20 \times T21) + (T22 \times T23) + (T24 \times T25) \\
 &+ (T26 \times T27) + (T28 \times T29) + (T30 \times T31) + DC) \quad (6)
 \end{aligned}$$

These data are used for characterization of common cause failures (CCF):

- $\beta_{DD} \approx \beta_{SO}$
- $\beta_{DD} \approx \beta_{SO} \approx 10\%$ for input element parts (S) and final elements (FE).
- $\beta_{DD} \approx \beta_{SO} \approx 1\%$ for the logical partial unit (LPU).

After the numerical applications, the estimated STR value is **5.97 E-05 hours (h)-1**.

A comparison of result and those obtained from analytical formulas previously shown (Section II) are specified in Table (2).

Designation	STR LUND/RAUSA (h ⁻¹)	STR _{ISA} (h ⁻¹)	STR SINTEF (h ⁻¹)	STR Markov (h ⁻¹)	STR _{ADD} (h ⁻¹)
Sensor (S)	1.91 E-05	2.22 E-05	8.42 E-06	1.48 E-05	1.45 E-05
Logic solver (LS)	4.48 E-05	7.53 E-05	3.60 E-05	4.47 E-05	4.47 E-05
Final Element (FE)	3.40 E-07	3.40 E-07	2.70 E-07	3.28 E-07	5.40 E-07
STR_{ESD}	6.43 E-05	9.78 E-05	4.47 E-05	5.99 E-05	5.97 E-05

Tab.2. STR estimation by different approaches

- After comparison of results, we notice the values of the STR estimated by FT method are similar to those estimated by implementing Markov chains method.
- STR value for FE subsystem « Final elements (FE) » is relatively small compared the other two subsystems values. Therefore, one can approximate the equation (1) of STR, it becomes:
- Results $STR_{ESD} \approx STR_{Si} + STR_{LS} \quad (7)$

V. Conclusion

As a reminder, our work aims to quantitatively asses and model the rate of spurious trip (STR: Spurious Trip Rate) implemented in an operating industrial facility, through the application of failures tree Analysis (FTA) method. A comparison between proposed and acquired results by applying the analytic formulas describes herein, indicates that the application FTA method is the right solution for risk analysis and quantification related to spurious trip of SIS.

It's noteworthy, that spurious trip should be reduced to the maximum as they are responsible of important losses within companies. Their decrease requires the right maintenance strategies application as for safety instrumented systems in order to achieve a safety balance compromise – availability. These strategies might be developed in the future works.

Références

- [1] A. Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Eyrolles, Paris, France ; 1988.
- [2] Dutuit.Y, F. INNAL et G. DECONINCK, étude complémentaire des systèmes instrumentés de sécurité - Rapport TOTAL 2009_version finale, l'ADERA (Association pour le Développement de l'Enseignement et des Recherches auprès des universités, des centres de recherche et des entreprises d'Aquitaine), 2009.
- [3] F. INNAL, Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances Analyse critique de la norme CEI 61508, Thèse de Docteur de L'Université BORDEAUX 1 ; 2008.
- [4] ISA-TR84.00.02. Safety instrumented functions (SIF)-safety integrity level (SIL) Evaluation techniques part3: Determining the SIL of a SIF via Fault tree Analysis Technical Report, Research

Triangle Park, NC: The Instrumentation, Systems, and Automation Society; 2002.

[5] ISA-TR84.00.02. Safety instrumented functions (SIF)-safety integrity level (SIL) Evaluation techniques part2: Determining the SIL of a SIF via Simplified Equations. Technical Report, Research Triangle Park, NC: The Instrumentation, Systems, and Automation Society; 2002.

[6] J.D. Andrews, L.M. Bartlett, A branching search approach to safety system design optimisation. Reliability Engineering and System Safety 2005; 87: 23–30.

[7] L. Lu, J Jiang. Analysis of on-line maintenance strategies for k-out-of-n standby safety systems. Reliability Engineering and System Safety 2007; 92: 144–55.

[8] M.A. Lundteigen, et M. Rausand, Spurious activation of safety instrumented systems in the oil and gas industry: basic concepts and formulas. Reliability Engineering and System Safety, 93:1208–1217; 2008.

[9] M.A Lundteigen, Safety instrumented systems in the oil and gas industry: Concepts and methods for safety and reliability assessments in design and operation. PHD-theses at NTNU; 2008.

[10] Mitsubishi Heavy Industries, LTD. MCEC (REV: 0) Plant Operation Manual / Volume-1 and 2; 2004.

[11] Mitsubishi Heavy Industries, LTD. MCEC (REV: 3), DESIGN BASIS; 16 apr. 2003.

[12] Norme CEI 61508, Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / électroniques / électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 1 à 7, octobre 1998-2000. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse.

[13] Norme CEI 61511, Sécurité fonctionnelle - Systèmes instrumentés de sécurité pour le domaine de la production pour processus – Parties 1 à 3, janvier 2003-juillet 2003. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse.

[14] P. Hokstad, and K. Corneliussen, Reliability Prediction Method for Safety Instrumented Systems; PDS Method Handbook, 2003 Edition. SINTEF Report STF38 A 02420, SINTEF, Trondheim, Norway; 2003.

[15] S. Cho, J. Jiang, Analysis of surveillance test interval by Markov process for SDS1 in CANDU nuclear power plants. Reliability Engineering and System Safety, in press, doi: 10.1016/j.res.2006.10.007; 2006.

[16] S.HADDAD, Evaluation et Optimisation des Performances des Systèmes Instrumentés de Sécurité pour une Meilleure Maîtrise des Risques. Mémoire de Magister de l'université Hadj Lakhdar de Batna ; 2012.

[17] SINTEF. Reliability prediction methods for safety instrumented systems,PDS method handbook. 2006 edition; 2006.

[18] SINTEF. Reliability Data for safety instrumented systems, PDS Data handbook. 2006 edition ; 2006.

Nomenclature and notations

λ	failure rate.
λ_D	dangerous failure rate.
λ_{DD}	dangerous detected rate.
λ_{DU}	dangerous undetected rate.
λ_S	safe rate.
λ_{SD}	safe detected rate.
λ_{SU}	safe undetected rate.
λ_{STD}	spurious trip detected rate.
λ_{STU}	spurious trip undetected rate.
λ_{NONC}	no critical failure rate.
λ_{SO}	spurious operation rate.
T_I	test interval.
$MTTR_{SD}$	mean time to repair safe detected.
β_D	beta factor for dangerous detected failures.
β_{SD}	beta factor for safe (spurious) detected failures.
β_{SU}	beta factor for safe (spurious) undetected failures.



IEOM Society International

The 11th Annual International Conference
Industrial Engineering and Operations Management
Singapore during March 7-11, 2021

Certificate of Presentation

This is to certify that

**Khanfri Nor El Houda, Touaher Hafed, Ouazraoui Nouara,
Simohammed Antar, Bouabid Djamel and Sellami Ilyas**
Health and Occupational Safety Institute, University of Batna-2, Batna, Algeria

Delivered an Oral Presentation entitled *"The contribution of maintenance to improve the operational performance of an industrial process"* at the Eleventh Annual International Industrial Engineering and Operations Management Conference Virtually via Zoom.

Professor Donald M. Reimer
Director of Membership and Chapter Development
IEOM Society International
President, The Small Business Strategy Group
Detroit, Michigan, USA

Dr. Ahad Ali - Conference Co-Chair
Associate Professor and Director of Industrial
Engineering
Lawrence Technological University, Michigan, USA
Executive Director – IEOM Society International

Sponsors and Partners



IEOM Society International, 21415 Civic Center Dr., Suite # 217, Southfield, Michigan 48076, USA, www.ieomsociety.org

The contribution of maintenance to improve the operational performance of an industrial process

Khanfri Nor El Houda, Touahar Hafed, Ouazraoui Nouara, Simohammed Antar and Bouabid Djamel

LRPI Laboratory, Health and Occupational Safety Institute,
University of Batna-2, Batna, Algeria

khanfri.safa24@gmail.com, hafedtouahar@gmail.com, n.ouazraoui@univ-batna2.dz, simo.antar@gmail.com, jmlghn@gmail.com

Sellami Ilyas

Department of Applied Engineering, Kasdi Merbah
University-Ouargla, Algeria

sellami.ilyas@univ-ouargla.dz

Abstract

In the petroleum industry, equipments must be maintained properly to meet the adequate reliability standards in order to achieve the desired business goals in terms of productivity, safety and environmental protection. This article offers a new approach focused on risk analysis to select a better maintenance strategy. The proposed approach consists of three stages. In the first step, we identify the accident scenarios that could lead to the loss of production and damage to the environment. In the second step, we estimate the frequency of occurrence of these scenarios. In the third step, we calculate the economic losses and environmental taxes. Finally, an appropriate maintenance strategy is proposed, taking into account the evaluation results obtained by the previous steps. A case study illustrates the proposed approach and shows that the latter constitutes an important decision support tool to improve the existing maintenance strategy to comply with regulations and standards in term of productivity, reduction of costs and environmental protection.

Keywords

Maintenance strategy, industrial process, environmental protection, risk based maintenance, importance analysis.

1. Introduction

The role of the oil sector in the national economy is essential. However, when oil installations fail, the consequences can be dramatic. They can cause serious economic losses, affect the population and cause serious damage to the environment.

In fact, Algeria has experienced in recent years a series of painful events affecting the majority of cities and which have revealed the extent of the problem of risks related to the hydrocarbon sector, such as: the explosion of the petrochemical complex of Skikda in January 2004 which caused 23 deaths and 74 injured, the Nezla well accident in September 2006 at the drilling platform in Gassi Touil (Hassi Messaoud) which caused 09 deaths and 78 people were injured and Loss of the drilling rig costing 4 million dollars and two bursts followed by fires on the gas pipeline in Relizane in August 2008 which caused injuries and material damage to local populations.

The efficient operation of these installations depends on the proper functioning of the maintenance management system which ensures the optimum availability of the installations, reduces the direct costs of intervention and the indirect costs incurred and ensures better safety of people, equipment and the environment and finally the achievement of the desired business objectives (Karsak, 2001), (Zhao *et al*, 2020), (Hammati *et al*, 2018).

From the 1990's, Risk Based Maintenance (RBM) received an increasing attention from researchers (Wang *et al*, 2012; Khan and Haddara, 2003; Selvikand Aven, 2011; Fereshthet *et al*, 2014; Chandima Ratnayake and Katarzyna^{a, b}, 2017; Lopes and Figueiredo, 2020). Khan and Haddara (Khan and Haddara, 2003) proposed a comprehensive framework for Risk Based Maintenance strategy, in which the probability of the accidental event was determined using Fault Tree Analysis (FTA) and the consequences involved the estimation of system performance loss, financial loss, loss of human health and environmental and / or ecological loss.

Arunraj and Maiti (2007) reviewed research on RBM using several qualitative / quantitative risk analysis tools such as Fault Trees, Event Trees, HAZared and OPerability study (HAZOP), Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA), etc.

The present work falls within this perspective and consists in proposing an analytical approach that aims to show the interest and the contribution of a good maintenance strategy in improving the operational performance of industrial processes and this for a better control of industrial risks and their environmental impacts.

To illustrate the proposed approach and show the contribution of maintenance in improving productivity, reducing costs and downtime and protecting the environment, it was applied on gas recovery plant (RGTE-In-Amenas Algeria). The obtained results show the appropriateness of this approach for choosing an adequate maintenance strategy.

2. Risk-based maintenance methodology

Maintenance management based on risk analysis allows the continuous and controlled improvement of processes with an optimal use of the available resources and the detection of the critical operations or activities in these processes.

The proposed approach in this work consists of (Figure 1):

- The first step consists of defining the objectives and the operational requirements of the system or process to be studied, and the collection of information on the structure and operation of the system, through a technical and functional analysis;
- Apply a method to identify accident scenarios relating to the failure of critical functions and / or components that may lead to loss of production and damage to the environment;
- estimate the frequency of occurrence of these scenarios;
- Calculate the economic losses and environmental taxes which can be generated in case of occurrence of these scenarios;
- Calculate the criticality of equipment;
- Finally, propose an appropriate maintenance strategy taking into account the evaluation results obtained by the previous steps.

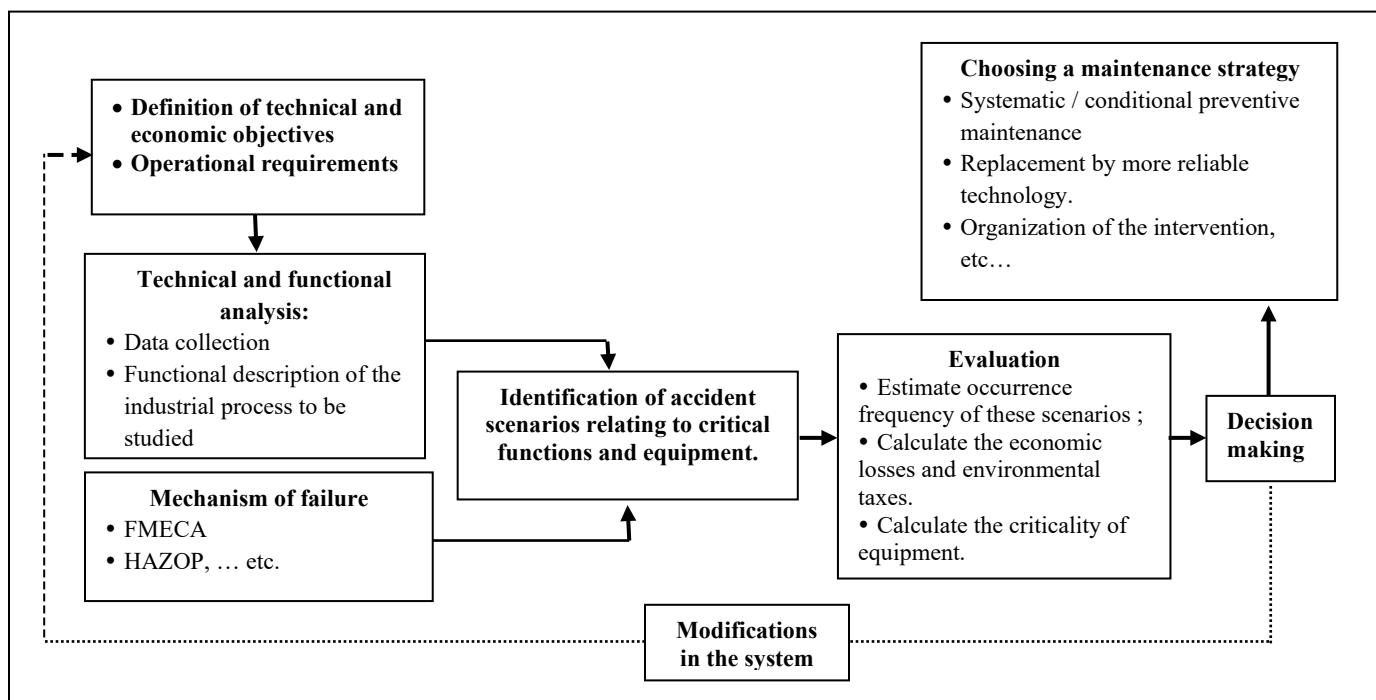


Figure 1. Maintenance management based on risk analysis.

3. Case Study

In order to validate our approach and show the contribution of maintenance in improving the operational performance of an industrial process, it was applied on gas recovery plant (RGTE-In-Amenas Algeria), which was created as part of an environmental protection project and for the reliable exploitation of Hydrocarbon processing facilities (Rudall Blanchard Associates, 2005).

The Objective of this application is to show that an adequate and well established maintenance strategy of a production system doesn't only improve the production and safety, but also contributes to environmental protection.

The RGTE Unit (*Récupération des Gaz Torchés du champ d'Edjelet*) is chosen as a case study, which aims to recover, compress, dehydrate and transport the gases usually flared at the ten (10) crude oil separation centers of the Edjelet field. The recovered gases will be used as *gas-lift* to be injected into oil wells which need activation (by gas-lift) in order to increase the production of crude oil or in certain cases to ensure the stable flow rate in the wells. In addition to the above objectives, the RGTE unit contributes in the reduction of the environmental pollution caused by flaring to comply with the terms of the **GGFR** (Global Gas Flaring Reduction Initiative) to which Algeria is part of it.

The analysis using HAZOP method reveals that the studied process may present several disturbances or deviation of operational parameters such as: drift of gas flow at the inlet and outlet of the blower section, compressor suction and discharge pressure deviation (11-K-001), temperature deviation at the level of the air coolers and the deviation in the liquid level in the separation tank 11-B-001... etc.

To deal with these deviations, the process is equipped with several regulation systems and an emergency shutdown system which, in case of activation, it ensures the automatic and total shutdown of the section to minimize the risk of damage (Figure 2).

In the case of deviation as an example "High liquid level" in the separation tank 11-B-001, the causes are the poor separation of the crude at the level of the upstream separators C7, C8, C9 and C10 or the malfunction of valve 11-LV-001.

Among the consequences of this deviation is the destruction of compressor 11-K-001, shutdown of the blower section and gas flaring at the ten crude oil separation centers in the Edjelet field.

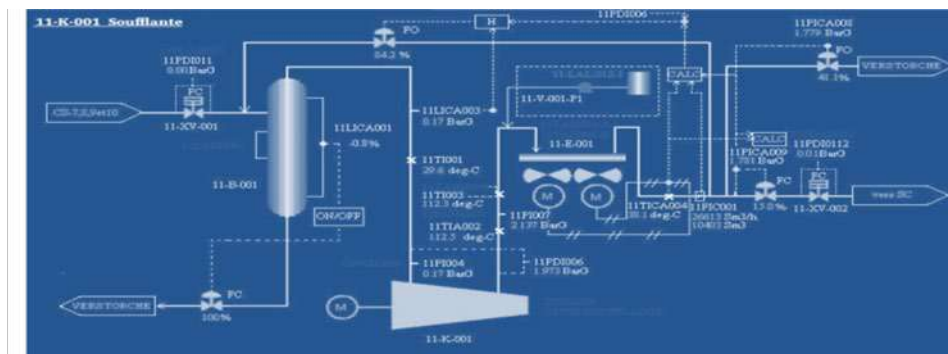


Figure 2. Blower unit diagram

3.1. Calculation of the initiating events frequencies and the probabilities of safety barriers failure

Various scenarios were established, two scenarios were selected resulting as consequences: the shutdown of blower section (destruction of compressor 11-K-001) and the flaring the entire quantity of gas, these scenarios are caused by the following initiating events:

- Failure of control loop Temperature-Pressure;
- Failure of control loop Level;

To prevent the occurrence of these consequences, the implemented safety barriers are:

- Alarm & operator;
- Emergency shutdown system ESD;
- Pressure relief Valve.

The ESD installed in the blower section is an SIS (safety instrumented system) functioning in low demand mode to ensure, in case of deviation, the total automatic shutdown of blower section. It consists of a set of input elements (transmitters, detectors) which monitor the evolution of physicochemical parameters representative of the behavior of the blower section process (temperature, pressure, level). If at least one of these parameters deviates beyond a set value and remains there, this deviation constitutes a demand or a solicitation, which is detected by the concerned sensor, this last send a signal to the logic solver unit which is a programmable logic controller of type Triconex Trident Controller (YOKOGAWA, 2003).

The used data to estimate the values of these parameters, namely the frequency of initiating events and the probabilities of failure on demand (PFD) of safety barriers, are taken from the literature (ICSI, 2009) and given in table (1).

Table 1: PFD and frequencies of the existents safety barriers (ICSI, 2009)

Element	PFD / Fr.
Alarm	1E-3
Pressure relief Valve	1E-2
Operator	1E-2
Control Loop	1E-1 per year

For the estimation of the PFD of ESD, the following simplified equations were used (IEC 61508-6, 2010). The PFD_{avg} of the SIS is deduced from the sum of the PFD_{avg} of the various subsystems that compose it and according to the architecture (KooN) of these last (Table 2).

Table 2 : Simplified PFD formulas

Architecture	Formula
1oo1	$PFD = \lambda_{DD} * MTTR + \lambda_{DU} (\frac{T1}{2} + MRT)$
KooN	$PFD = \lambda_N^{N-K+1} \prod_{i=1}^{N-K+1} [\lambda_{DU}^{ind} (\frac{T1}{2} + MRT) + \lambda_{DD}^{ind} MTTR] + \lambda_{DU}^{CCF} (\frac{T1}{2} + MRT) + \lambda_{DD}^{CCF} MTTR$.

Where:

λ_{DD} : Dangerous detected rate,

λ_{DU} : Dangerous undetected rate,
 MTTR: Mean Time to Repair,
 T_1 : time between two periodic tests,
 CCF: Common cause failure.

The used data to estimate the PFD of ESD system of the blower section are taken from the reference (SINTEF, 2005) and are grouped in Table (3).

Table 3: Data relating to the elements of the ESD system.

Element	λ_D (10E-6 per hour)	λ_{DU} (10E-6 per hour)	MTTR=MRT (hour)
Level Transmitter	1.4	0.6	10
Pressure Transmitter	0.8	0.3	10
Pressure Switch	2.3	2	10
Temperature Transmitter (detector)	0.7	0.3	10
Processing module (one card)	15	5	8
Isolation valve	3	2.1	10

For the characterization of common cause failures (CCF) we take (Touahar, 2015):

$\beta_{DD} = \beta_{DU} = 10\%$ for input elements (S) and final elements (FE);

$\beta_{DD} = \beta_{DU} = 1\%$ for the logical unit part (PLC).

Where β factor for quantification of CCF.

T_1 : The time between two periodic tests is equal to 1 year = 8760 h. (company data).

In this case:

$$PFD_{ESD} = \prod_{i=1}^{N=22} PFD_{Si} + PFD_{LS} + PFD_{FE} \quad (1)$$

$$PFD_{ESD} = 0.194E-2$$

3.2. Calculation of the lost and flared gas frequency

Figures (3) and (4) show the event trees relating to the two accident scenarios selected for this study.

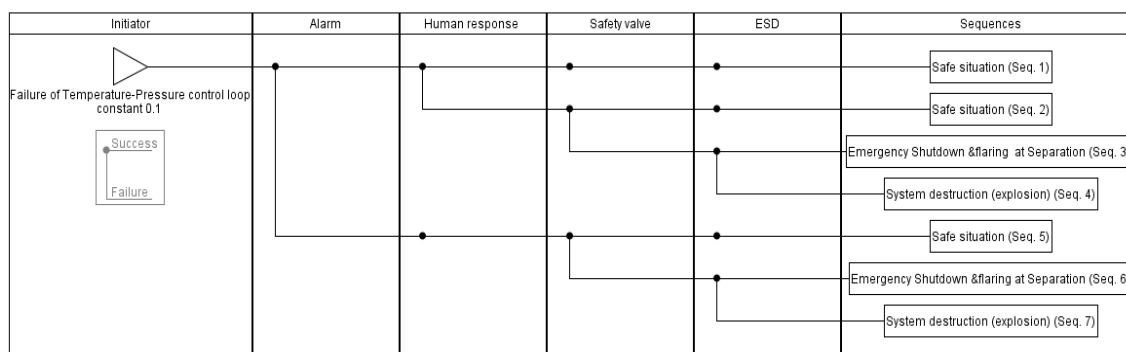


Figure 3.Event tree of Scenario 1.

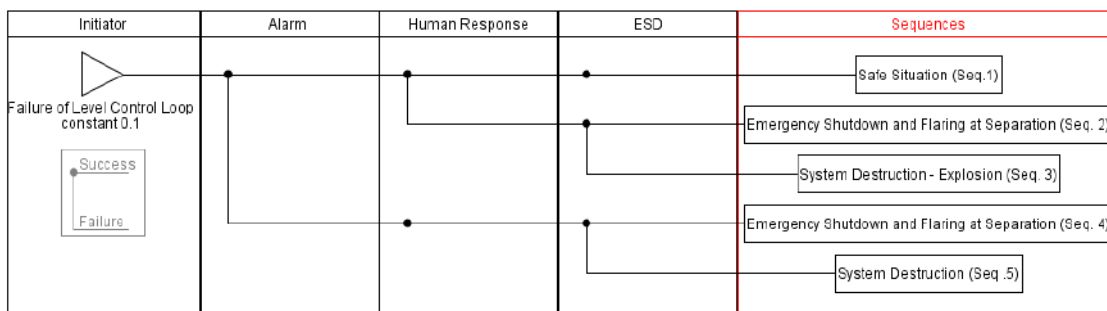


Figure 4.Event tree of Scenario 2.

- The flaring frequency for the first scenario:

$$Fr(\text{Flaring}) = Fr(\text{seq.03}) + Fr(\text{seq.06}) = 5, 48.1\text{E-3/year.}$$

- The flaring frequency for the second scenario:

$$Fr(\text{Flaring}) = Fr(\text{seq.02}) + Fr(\text{seq.04}) = 5, 4.1\text{E-1/year.}$$

3.3. Calculation of the lost and flared gas volume:

Each shutdown of the blower section will lead to the loss and flaring of a large quantity of gas at the separation centers, in addition to the decrease in gas-lift pressure at the outlet of the compressor section, which causes a decrease in the production of oil wells.

Although flaring is a safety measure, but it is a waste of a valuable energy resource that could have been used to support economic growth.

Flaring also has a significant environmental impact on climate change, as it represents an additional volume of CO₂ emissions, the main greenhouse gas.

To estimate the amount of gas flared during shutdown of the blower section, the following relationship is used:

$$V = Q_{act} * T \quad (2)$$

Where Q_{act} the current flow of associated gas and T is the downtime of the blower section.

The used data to estimate the gas flow at the inlet to the blower section and the gas volume of flared gas were taken from (Mitsubishi Heavy Industries, 2004).

Table 4: Data relating to the conditions of the blower section feed gas

Parameter	value
standard flow rate of associated gas (Q_{st})	610500 SM ³ /day
the associated standard gas pressure(P_{st})	1.01325 bar
the current associated gas pressure(P_{act})	0.1 bar
the current associated gas temperature(T_{act})	55 C ⁰
the associated standard gas temperature(T_{st})	15 C ⁰
compressibility factor(Z)	19.84

The national authority ALNAFT (Official Journal, 2005) estimates the fee of flaring gas as: for every 1000 cubic Nm of flared gas corresponding to 2000 DZD (15.3 \$USD). Table 5 below shows the estimated results of the flared gas and the production loss and penalty costs for flaring for each shutdown of the blower section.

Table 5: Estimated quantities of flared gas, flaring penalty, production loss cost associated to the blower section.

Shutdown time (hour)	Flared gas volume (m3)	Flaring penalty (US Dollar)	Production loss cost (US Dollar/year). 4 Separation Complex	Total costs
12	18 483 501.2	28 490.88	55 450 503.6	55 478 994.48
24	36 967 002.4	569 771.08	110 901 007.2	111 470 778.3
14	21 564 084.7	3 323 366.46	64 692 254.1	68 015 620.56

3.4 Equipment criticality analysis

Among the used solutions to ensure maintenance strategic optimization; the critical analysis of technical equipment based on the importance measure analysis. The importance measures allow to:

- Identify the most critical components to system performance and measure the contribution of each component (or basic event or cut set) to system failure;
- Determine which components need to be upgraded as a priority to increase the reliability of the system and minimize its probability of failure;
- Establish fault diagnosis and choose an appropriate maintenance policy.

In this work, we adopted the calculation of the marginal importance measure (MIM) (Limnios, 1991) given by the equation:

$$MIM_i(t) = Q(1_i, q(t)) - Q(0_i, q(t)) \quad (3)$$

The determination of this measure makes it possible to identify components whose reliability needs to be improved as a priority to improve the overall system's performance.

The obtained results for scenarios 1 and 2 are given respectively in Tables 6 and 7.

Table 6: Marginal Importance Measure relating to the safety barriers of the blower section (scenario 1)

Time	MIM	Component
8760.0	0.0000000E+00	ESD
8760.0	9.9706194E-04	Safety valve
8760.0	9.9998808E-02	Alarm

Table 7: Marginal Importance Measure relating to the safety barriers of the blower section (scenario 2)

Time	MIM	Component
8760.0	0.000000E+00	ESD
8760.0	9.880794E-02	Alarm

The obtained MIM values were calculated for the critical consequences: Emergency Shutdown response and flaring at Separation.

3.4. Discussion

The flaring in the first scenario is less likely to occur than the second one; this is due to the existing of safety relief valve which reduces the intervention of the emergency shutdown system. The production loss and flaring frequency estimated to $0.548E-3$ per year.

For the second scenario where the failure of second safety barrier (human response) conducts directly to either the loss of production/ flaring or destruction of the system depending on ESD availability. The production loss and flaring occurrence frequency is about $0.54E-1$ per year which leads to higher costs related to flaring taxes and production loss.

It can be seen that the quantity of flared gas in each shutdown is considerable and the production loss and penalty costs are very high, which constitutes additional costs to the company. In this case improving the maintenance of the safety barriers which are the main cause of these consequences is essential. Therefore, selecting an adequate maintenance strategy ensuring the reduction of loss costs requires the classification of equipment (control loops and safety barriers) according to their criticality. The importance analysis allowed us to determine which equipment is most important in contributing to the occurrence of the critical consequence under study.

According to the obtained results of this analysis, the ESD has more importance in contributing to the occurrence of the critical consequence (Emergency Shutdown response and flaring at Separation), then the safety valve and finally the alarm for the first scenario. Likewise, the second scenario, the ESD contributes more to the occurrence of the critical consequence in relation to the alarm.

These results can be used for the optimal allocation of maintenance resources, which led to plan test and repair times, minimize expenses and thus reduce the frequency of occurrence of adverse events. The significance analysis is therefore a decision support tool.

4. Conclusion

The problem of decision-making on the planning of maintenance tasks remains at the heart of industrial concerns. Indeed, the impacts of poorly planned maintenance are not limited to production loss, but can also lead to risks to installations, the personnel safety and damage to the environment. For this reason, adopting an appropriate maintenance strategy is essential to prevent a technical failure and its propagation from leading to these effects.

This work based on risk analysis for the selection of a better maintenance strategy. The application of the proposed approach to an operational industrial process has shown an optimal allocation of maintenance resources by taking into account the results of the risk analysis. The proposed approach can help in decision making.

Reference:

- Arunraj NS., and Maiti,J.,Risk-based maintenance - techniques and applications. *J Hazard Mater*, 142(3): 653-61, 2007.
- ChandimaRatnayake, R. M. and KatarzynaAntosz (a) , Development of a risk matrix and extending the risk –based maintenance analysis with fuzzy logic, *7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, Procedia Engineering 182,602 – 610,2017.
- ChandimaRatnayake R. M. and KatarzynaAntosz (b), Risk-based maintenance assessment in the manufacturing industry: minimisation of suboptimal prioritisation, *Management and Production Engineering Review*, Volume 8 Number 1, pp. 38–45, March 2017.
- Darragi M., Georges A., Raynald V., DraganK.j. andMichel c., Improving the reliability of equipment through the optimization of preventive maintenance, *6th International Congress of Industrial Engineering*, June 7-10, 2005, Besançon, France.
- Fereshteh J, Zelina Z. Ibrahim, Mohammad Reza Zahiri, Criticality Analysis of Petrochemical Assets using Risk Based Maintenance and the Fuzzy Inference System, *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 23, No. 6, 2033-2037, 2014.
- HemmatiN., MasoudRahiminezhadGalankashi, Din Mohammad Imani and HiwaFarughi, Maintenance policy selection: a fuzzy-ANP approach, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 29 No. 7, pp. 1253-1268, 2018.

- Hongyan D., Shubin Si. and Richard C.M. Yam, A cost-based integrated importance measure of system components for preventive maintenance, *Reliability Engineering and System Safety*, doi:10.1016/j.ress.2017.05.025, 2017.
- Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle (ICSI Les cahiers de la sécurité industrielle: Fréquences des événements initiateurs et d'accident, *Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle*, Aout 2009. Available: <http://www.icsi-eu.org/>.
- IEC 61508, *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related Systems*, IEC 61508 Standard, Parts 1-6, second edition, Geneva, 2010.
- Khan FI., Haddara MM., Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning, *J Loss Prev Process Ind.*, 16(6): 561-73, 2003.
- Karsak E.E., Tolga E., Fuzzy multi-criteria decision making procedure for evaluating advanced manufacturing system investments. *International Journal of Production Economics*, 69, 49–64, 2001.
- Lopes.I.SandFigueiredoV.Sá., Criticality evaluation to support maintenance management of manufacturing systems”, Ed. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 11; pp. 3 -18, 2020.
- Mitsubishi Heavy Industries, LTD. MCEC (REV: 0) Plant Operation Manual /Volume-1 and 2; 2004. Mitsubishi Heavy Industries, LTD. MCEC (REV: 0) Plant Operation Manual /Volume-1 and 2; 2004.
- NORSOK Standard Z-008 rev. 3, Risk based maintenance and consequence classification, Ed. *Lysaker: Standards Norway*; p:46, 2011.
- Rudall Blanchard Associates, VER : 1, Hazard Study of RGTE Proje, *Report, Sonatrach DP In Amenas, Algeria*, 2005.
- Selvik .J.T. andAven.T., A framework for reliability and risk centered maintenance, Ed.Elsevier; p : 324–331, 2011.
- Limnios.N., Fault Trees.Edition HERMES, PARIS, 182 pages, 1991.
- Touahar, H. , “Maintenance of Instrumented Security Systems (SIS): Case study”, Master thesis, Ed. HADJ-Lakhdar University, Batna, Algeria, p89, 2015.
- Ratnayake, R.M.C. ,Application of a fuzzy inference system for functional failure risk rank estimation: RBM of rotating equipment and instrumentation, *International Journal of Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 29, pp. 216-224, 2014.
- Wang Y., Cheng G., Hu H. and Wu W., Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant, *J Loss Prev Process Ind.*; doi: 10.1016/j.jlp, 2012.
- YOKOGAWA: Distributed Control System (DCS) graphic display plan, *Mitsubishi Heavy Industries, LTD. MCEC (REV: 2)*; 2003.
- SINTEF. Reliability prediction methods for safety instrumented systems, PDS Data Hand Book, 2006 Edition.
- ZhaoYixiao, Yihai He , Di Zhou, Anqi Zhang, Xiao Han, Yao Li and Wenzhuo Wang, Functional risk-oriented integrated preventive maintenance considering product quality loss for multistate manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 2020.